

# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta Elektrotechnická



### Diplomová práce

Řešení elektročásti malé vodní elektrárny Štětí 2x 3,5MW

Proposal of electrical part for small hydropower station Štětí 2x3,5 MW

Autor Práce: Bc. Karel Šlapák

Vedoucí práce: Ing. Petr Kalandra

Praha 2016



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Karel Šlapák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Řešení elektročásti malé vodní elektrárny Štětí 2 x 3,5 MW**

Pokyny pro vypracování:

1. Návrh jednopólového schématu se zahrnutím různých pohledů řešení - spolehlivost, minimalizace ztrát, najetí MVE do vyčleněné sítě, napájení vlastní spotřeby při záplavách, řešení elektrických ochranných a pod.
2. Dimenzování jednotlivých částí elektro: vývodový transformátor, měřicí proudové transformátory a pod.
3. Varianty řešení vyvedení výkonu - vliv na distribuční síť
4. Způsoby indikace provozu do vyčleněné sítě
5. Stabilita provozu do vyčleněné sítě a při provozu paralelně se sítí v podbuzeném stavu
6. Výkonové bilance jalového výkonu z pohledu provozních podmínek stroje a sítě.

Seznam odborné literatury:

- [1] HORA, Oldřich. Regulační a budicí systémy synchronních strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. ISBN ISBN.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN ISBN.
- [3] Uhlíř : Elektrické stroje a pohony, Praha ČVUT 2002
- [4] Fencel : Elektrické rozvody a rozvodná zařízení, Praha, ČVUT, 2003
- [5] IEEE 421.2 (1990) - Dynamic Performance Definition Guide
- [6] Podklady od technologického zařízení MVE Štětí

Vedoucí: Ing. Petr Kalandra

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018



doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze:.....

Podpis:.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu své Diplomové práce Ing. Petru Kalandrovi za odborné vedení a podnětné rady k mé Diplomové práci.

**Abstrakt:**

Tématem Diplomové práce je zvážit možnosti variant řešení elektrické části již zrealizované MVE Štětí. Zvážit možnosti zapojení vývodů elektrické energie z generátorů a zhodnocení navržených variant. Provést kontrolu základního dimenzování vybraných komponent použitých při realizaci malé vodní elektrárny. Zvážit varianty realizace vyvedení výkonu z MVE v závislosti na podkladech od distribuční elektrické sítě. Nalezení způsobů indikace změny při přechodu provozu paralelně se sítí do provozu do vyčleněné sítě. Zhodnocení důvodů, které vedou provozovatele distribuční sítě k požadavku, aby i synchronní generátory byly provozovány v podbuzeném stavu. Zhodnotit vhodnost tohoto provozního režimu z pohledu generátoru a jeho provozní stability. Zhodnocení výkonové bilance jalového výkonu z pohledu provozních podmínek stroje a sítě.

**Summary:**

The topic of thesis is to consider the possibilities of their solutions already implemented the electrical part of MVE Štětí. Consider the possibility of wiring ducts electricity from generators and evaluation of proposed options. Check the basic design of the selected components used in the implementation of small hydropower plants. Consider modalities of implementation of the power output of MVE based on evidence from the distribution grid. Finding ways indication of a change in the transition operation in parallel with the network into operation dedicated network. Assessing the reasons why the grid operator to request that and synchronous generators are operated in excitation state. Evaluate the appropriateness of this operating mode from the perspective of the generator and its operational stability. Assessing the performance balance of reactive power from the perspective of the operating conditions of machines and networks.

### 1. Seznam zkratk:

MVE	malá vodní elektrárna
tzv.	takzvaný
č.	číslo
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ČSN	česká státní norma
IEC	mezinárodní technická komise
kV	kilo volt
MW	mega watt
$m^3 s^{-1}$	metry krychlové za sekundu
GWh	giga watt hodina
kW	kilo watt
MVA	mega volt ampér
sec	sekunda
PG	pomocný budič
BG	hlavní budič
NN	nízké napětí
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
ZVN	zvlášť vysoké napětí
HDO	hromadné dálkové ovládání
ES	elektrická síť
Yd	zapojení transformátoru hvězda-trojúhelník
Dy	zapojení transformátoru trojúhelník-hvězda
Yz	zapojení transformátoru hvězda-lomená hvězda
A	průřez vodiče [mm <sup>2</sup> ]
J	dovolená proudová hustota pro daný materiál [A/mm <sup>2</sup> ]
$I_{dov}$	dovolený proud [A]
R	odpor [Ω]
$I_{max}$	proud maximální [A]
$\tau_z$	doba plných ztrát [h/rok]
$\xi = \frac{I_{stř}}{I_{max}}$	zatěžovatel [-]
$I_{stř}$	střední hodnota proudu [A]
$I_{ef}$	efektivní hodnota proudu [A]
$I_{max}$	maximální hodnota proudu [A]
T	doba [h]
k	součinitel závislý na druhu vodiče [mm <sup>2</sup> /As]
$I_v$	výpočtový proud [A]
$\rho$	měrná rezistence vodiče na jednotku délky [Ω/m]
l	délka vodiče [m]
I	proud v jednom vodiči [A]
cos φ	účinník [-]
P	výkon přenášený po vedení [W]
$U_f$	fázové napětí [V]
$U_s$	sdužené napětí [V]
%	procento
$u_s$	napětí sítě [-]



$u_{VS}$	napětí vlastní spotřeby [-]
$i_{VSj}$	proud vlastní spotřeby jalový [-]
$x_T$	reaktance transformátoru [-]
$x_S$	reaktance sítě [-]
$U_s$	napětí sítě [V]
$U_V$	napětí vztažné [V]
$p$	převod [-]
$S_V$	vztažný výkon [VA]
$S_{ks}$	výkon sítě [VA]
$I_k'$	efektivní hodnota ustáleného proudu [A]
$I_k''$	efektivní hodnota přechodového proudu [A]
$I_k'''$	efektivní hodnota rázového proudu [A]
$T_d'$	přechodová časová konstanta [-]
$T_d''$	rázová časová konstanta [-]
$i_k(t)$	okamžitá hodnota zkratového proudu [A]
$i_{st}(t)$	okamžité hodnota stejnosměrné složky proudu [A]
$i_a(t)$	okamžité hodnota střídavé složky proudu [A]
$x_v$	reaktance vedení [ $\Omega$ /km]
$x_g$	reaktance generátoru [ $\Omega$ ]
$S_s$	zkratový výkon soustavy [MVA]
$U_{vz}$	vztažné napětí [kV]
$S_{vz}$	vztažný výkon [MVA]
$x_{cel}$	celková reaktance [-]
$I_{ks}$	zkratový proud soustavy [kA]
$X$	reaktance [ $\Omega$ ]
$\Delta I$	rozdíl proudů [-]
$k_s$	koeficient současnosti [-]
$P_{ns}$	výkon současně připojených spotřebičů [kW]
$P_n$	celkový nainstalovaný výkon [kW]
$P_s$	výkon současně pracujících spotřebičů [kW]
$\eta_m$	účinnost spotřebičů při daném využití [-]
$\eta_s$	účinnost napájecího systému [-]
$P_s$	skutečné zatížení současně připojených spotřebičů [kW]
$\beta$	koeficient náročnosti [-]
$P_v$	výpočtový výkon [kW]
$P_i$	instalovaná výkon [kW]
$I_{v1}$	výpočtový proud jedné fáze [kA]
$I_{v3}$	výpočtový proud trojfázový [kA]
$I_{vss}$	výpočtový proud stejnosměrný [kA]
Abs U	absolutní hodnota napětí [V]
Arg U	argument napětí [°]
P/Real S	činný výkon [-/W]
Q/Imag S	jalový výkon [-/var]
Diag	diagonální
f	frekvence [Hz]
$\Delta P$	rozdíl výkonů [-]
$X_d$	reaktance podélná [ $\Omega$ ]

$X_q$	reaktance příčná [ $\Omega$ ]
$m$	počet fází [-]
$U_{1f}$	napětí 1 fáze [V]
$I_{1f}$	proud 1 fáze [A]
$\beta$	úhel zátěžný [°]
$U_b$	napětí buzení [V]
$M$	moment [Nm]
$p$	počet pól párů [-]
$k_s$	synchronizační konstanta [W]
$X_\sigma$	rozptylová reaktance [ $\Omega$ ]
$R_{1f}$	odpor jedné fáze [ $\Omega$ ]
$U_{bn}$	napětí buzení jmenovité [V]
$\Delta U_i$	změna napětí v uzlu i [V]
$a_{ij}$	koeficient citlivosti změny napětí v uzlu i na změnu jalového výkonu v uzlu j [A]
$\Delta Q_j$	změna jalového výkonu v uzlu j [VAr]
$I_b$	budící proud [A]

## Obsah

1.	Teoretický úvod: .....	1
2.	Specifikace MVE Štětí.....	1
3.	Návrh jednopólového schématu.....	1
3.1.	Návrh dle systému přípojníc .....	2
3.1.1.	Jednoduchý systém přípojníc.....	2
3.1.2.	Dvojitý systém přípojníc.....	2
3.2.	Topologie schématu - Vyvedení výkonu z generátoru.....	2
3.2.1.	Společný transformátor s vyvedením výkonu do vlastní spotřeby přes společnou sběrnici u generátoru .....	2
3.2.2.	Společný transformátor se zajištěním výkonu pro vlastní spotřebu z distribuční sítě .....	2
3.2.3.	Blokové transformátory pro jednotlivé alternátory .....	3
3.3.	MVE Štětí.....	3
4.	Dimenzování .....	3
4.1.	Návrh silnoprůdých vodičů: .....	3
4.1.1.	Velikost hospodárného průřezu: .....	4
4.1.2.	Dimenzování dle úbytku napětí na vodiči:.....	5
4.2.	Dimenzování transformátorů.....	5
4.3.	Návrh ochran.....	7
4.3.1.	Rozdělení ochran synchronních generátorů:.....	10
4.4.	Dimenzování rozvaděčů .....	11
4.5.	Návrh velikosti napájecího zdroje pro konečného odběratele:.....	11
4.6.	Výpočtové zatížení nehomogenní skupiny spotřebičů: .....	12
5.	Variety vyvedení výkonu – vliv na distribuční síť.....	12
5.1.	Gauss-Seidelova metoda.....	14
5.2.	Newton-Raphsonova metoda .....	16
5.1.	Využití metod .....	19
6.	Identifikace provozu do vyčleněné sítě .....	19
6.1.	Loss Of Mains (LOM) .....	21
6.1.1.	Metoda ROCOF .....	21
6.1.1.1.	Přímá kontrola vypnutí.....	22

6.1.1.2.	Přímé měření otevřených kruhových sítí .....	23
6.1.2.	Metoda vektorového skoku .....	23
7.	Stabilita provozu do vyčleněné sítě a při provozu paralelně se sítí v podbuzeném stavu.....	24
7.1.	Požadavky na budící soustavy:.....	28
7.2.	Druhy budících soustav .....	29
8.	Výkonová bilance jalového výkonu.....	31
8.1.	Provozní diagram synchronního alternátoru .....	32
8.1.1.	Omezení maximálním budícím proudem .....	33
8.1.2.	Omezení maximálním proudem statoru.....	33
8.1.3.	Omezení magnetickým polem v čelním prostoru.....	33
8.1.4.	Omezení statickou stabilitou .....	33
8.1.5.	Omezení nulovým budícím proudem .....	33
8.2.	Řízení dodávky jalového výkonu .....	34
8.2.1.	Primární regulátor napětí .....	34
8.2.1.1.	Změnou zadaného generátorového napětí primárního napětí generátoru ..	34
8.2.1.2.	Změnou odbočky blokového transformátoru .....	34
8.2.2.	Budící soustavou .....	34
8.3.	Možnosti řízení jalového výkonu .....	35
9.	Závěr.....	36
10.	Citovaná literatura .....	37
11.	Obsah přiloženého CD .....	39
12.	Seznam tabulek.....	40
13.	Seznam obrázků .....	41
14.	Hodnocení práce .....	42

## 1. Teoretický úvod:

Tato práce se zabývá rozбором návrhu malé vodní elektrárny. Především je řešen návrh elektrické části počínaje generátorem až po možnosti vývodu vyrobené energie z elektrárny do sítě. Práce řeší vlivy připojení na síť i na generátor. Dále možnosti dimenzování jednotlivých komponent použitých při návrhu.

Praktická část práce je vytvořena pro již postavenou MVE Štětí. Dle dosavadních zkušeností provozovatelů elektrárny se vyskytly v průběhu provozu určité problémy a důvodem této práce je hledání způsobů jak lze MVE navrhnout a zda by nebyla možnost navrhnout některé části lépe. Dále se práce zabývá možností vyvedení výkonu do blízkého 22 kV vedení v blízkosti elektrárny a vlivy na síť po připojení do tohoto vedení.

## 2. Specifikace MVE Štětí

Práce je vypracována pro MVE Štětí, která využívá potenciál řeky Labe. MVE byla postavena na jezu Štětí-Račice. Elektrárna byla postavena se dvěma přímoproudými Kaplanovými turbínami. Jejichž instalovaný výkon je pro každou 3,6 MW. Hltnost systému je navržen na celkově  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Předpokládaná roční výroba energie je 31,5 GWh. (1)

Pro výrobu elektrické energie jsou použity synchronní generátory o jmenovitém napětí 6,3 kV. Na vývodu generátorů jsou připojeny blokové transformátory jejichž vývody jsou připojeny do rozvodny 22 kV. Celkový výkon elektrárny je vyveden do distribuční sítě kabelovou přípojkou. Vyrobenou elektrickou energii vykupuje společnost E.ON Energie. Vlastní spotřeba je napájena z rozvodny 22 kV přes transformátor vlastní spotřeby na hladinu napětí 400 V. Za transformátorem je hlavní nízkonapěťový rozvaděč pro celou vlastní spotřebu MVE, jehož maximální soudobý odběr je 50 kW. (1)

## 3. Návrh jednopólového schématu

Jednopólové schéma pro elektrárnu zahrnuje generátor, transformaci z generátorového napětí na napětí sítě, transformátor pro napájení vlastní spotřeby, možnosti měření jednotlivých částí, možnosti vypínání či odpojování částí a ochrany pro jednotlivé části. Tyto komponenty jsou složeny do schématu odpovídajícího návrhu dle zadání zadavatele. Tedy dle parametrů - celkové ceny investic, provozní variability a provozní spolehlivosti a bezpečnosti. U provozní spolehlivosti je hlavně sledována možnost zálohovatelnosti napájení pro zařízení vlastní spotřeby, možnosti vyvedení výkonu při manipulacích a údržbě, možnosti najetí elektrárny ze tmy a schopnost selektivního odstavení části elektrárny při dílčích poruchách. Další podmínky mohou být možnosti výměny zařízení bez narušení provozu, tedy možnost odklonění vyvedení výkonu jinou větví než základní a snaha vyvedení výkonu s minimálními ztrátami. (2)

### **3.1.Návrh dle systému přípojníc**

#### **3.1.1. Jednoduchý systém přípojníc**

Návrh lze vytvořit pro jednoduchý systém přípojníc, který má vyvedení výkonu přes samostatné transformátory pro jednotlivé alternátory. Lze tento systém zálohovat způsobem přepínání vyvedení výkonu přes tzv. podélný spínač, který oddělí či spojí možnosti vyvedení jedním či dvěma vývody do distribuční sítě. Příklad uveden v **Přílozeč.1 - Jednoduchý systém přípojníc.** (2)

#### **3.1.2. Dvojitý systém přípojníc**

Další možností je zvýšení zálohovatelnosti v podobě dvojitého systému přípojníc, kde z každé větve od alternátoru je připojen do přípojníc, které jsou k sobě paralelně zapojeny a spojeny přes příčný spínač přípojníc. Příklad uveden v **Příloze č. 2 - Dvojitý systém přípojníc.**

Tento systém je oproti jednoduchému systému přípojníc investičně dražší, ovšem výhodou je možnost výměny kterékoli části bez jakéhokoliv narušení vyvedení výkonu. (2)

### **3.2.Topologie schématu - Vyvedení výkonu z generátoru**

Při vyvedení výkonu je nutné brát v úvahu i nutnost zabezpečení vlastní spotřeby. Vlastní spotřebu lze zálohovat způsobem odběru energie za alternátorem se zálohou z distribuční sítě. Druhá možnost je zajištění vlastní spotřeby pouze z distribuční sítě. (2)

#### **3.2.1. Společný transformátor s vyvedením výkonu do vlastní spotřeby přes společnou sběrnici u generátoru**

Tato realizace se používá pro vyvedení u menších výkonů. Vyvedení z jednotlivých alternátorů je dovedeno do společné rozvodnice, ze které je vyvedeno vedení na vývodový transformátor a na transformátor vlastní spotřeby.

Výhodou tohoto zapojení je snížení počtu nutných transformátorů. Společný vývodový transformátor je výkonově navržen pro možnost vyvedení plného výkonu všech generátorů. Transformátor pro napájení vlastní spotřeby je možné zapojit na společnou sběrnici, která je zálohovaná pro případ vypadnutí napájení z alternátorů přes blokový transformátor. V případě, že je vlastní spotřeba napájena ze sítě přes vývodový transformátor, je napájení vlastní spotřeby zajištěno přes dva transformátory, z toho jeden (vývodový) je velkého výkonu. Takovýto způsob napájení malého výkonu vlastní spotřeby je dlouhodobě velice neekonomické.

Příklad viz: **Příloha 3 –Dvojitě zálohovaná vlastní spotřeba** (2)

#### **3.2.2. Společný transformátor se zajištěním výkonu pro vlastní spotřebu z distribuční sítě**

Vyvedení výkonu může být stejné jako v kapitole 3.2.1. Rozdíl je ve způsobu napájení vlastní spotřeby, které je realizováno přes jeden transformátor z vedení sítě.

V tomto zapojení jsou podobné podmínky jako pro dvojitě zálohovanou vlastní spotřebu. Výhodou této varianty je snížení počtu transformátorů v elektrárně a tím snížené počáteční náklady. Nevýhodou je případ, kdy vypadne napájení ze sítě, musí být jako náhradní zdroj použit diesel generátor.

Příklad viz: **Příloha 4–Vlastní spotřeba z externího zdroje (2)**

### **3.2.3. Blokové transformátory pro jednotlivé alternátory**

Tato realizace se používá především pro vyvedení výkonu větších elektráren. Každý z alternátorů má vlastní blokový transformátor. Výhodnou této realizace je snížení výkonu jednotlivých transformátorů a možnost provozu alespoň jednoho bloku i při odstavení jednoho blokového transformátoru.

Příklad viz: **Příloha 5–Blokové transformátory. (2)**

### **3.3.MVE Štětí**

V případě pro malou vodní elektrárnu Štětí jsou základem dva generátory každý o jmenovitém výkonu 3,6 MVA. Zde mohla být zvažovány varianty, kde bude transformátor pro každý z generátorů či jeden společný transformátor. Dále se dá navrhnout různé zapojení pro napájení vlastní spotřeby.

Vyvedení výkonu je realizováno z každého alternátoru přes blokový transformátor z hladiny napětí 6,3 kV na hladinu 22 kV. Každý z alternátorů je samostatně jištěn vlastními elektrickými ochranami působícími na vypínač v rozvodně 22kV na vývodu blokového transformátoru. Z hladiny 22 kV je přes transformátor napájena vlastní spotřeba na hladině 0,4 kV. Vývod z elektrárny je vyveden přes měření vyrobené energie.

Systém elektrických ochran je popsán v kapitole 4.3.1. Samostatný systém ochran tvoří systém chránění obvodů vlastní spotřeby, kde jsou zajištěny pro jednotlivé motory například tepelnou ochranou, která v případě chyby odpojí motor od napájecí sítě.

## **4. Dimenzování**

Při návrhu jednotlivých částí elektrárny je nutné zvolit vhodné velikosti jmenovitých parametrů pro jednotlivá zařízení. Tento návrh se provádí dle pravidel uvedených v normách a technických podkladů výrobců.

### **4.1.Návrh silnoprůdých vodičů:**

Při navrhování průřezu vodičů se musí brát v úvahu dovolená provozní teplota, způsob uložení vodiče, hospodárnost návrhu, mechanická pevnost, úbytek napětí na vodičích, odolnost vůči silovým i tepelným účinkům zkratových proudů. (3)

Určení průřezu vodiče z hlediska dovolené provozní teploty je definováno vztahem:

$$A \geq \frac{I_{dov}}{J} \quad [1] \quad A - \text{potřebný průřez vodiče} [\text{mm}^2]$$

$J$  – dovolená proudová hustota pro daný materiál  
[A/mm<sup>2</sup>]

$I_{dov}$  – dovolený proud [A]

Skutečný zatěžovací proud by neměl dovolenou hodnotu proudu překročit.

Hospodárny průřez je charakterizován závislostí hospodárné proudové hustoty a velikosti doby plných ztrát:

$$\int_0^T Ri^2(t)dt = RI_{max}^2 \tau_z \quad [2] \quad R - \text{odpor } [\Omega]$$

$I_{max}$  – proud maximální [A]  
 $\tau_z$  - doba plných ztrát [s]

z toho vyplývá

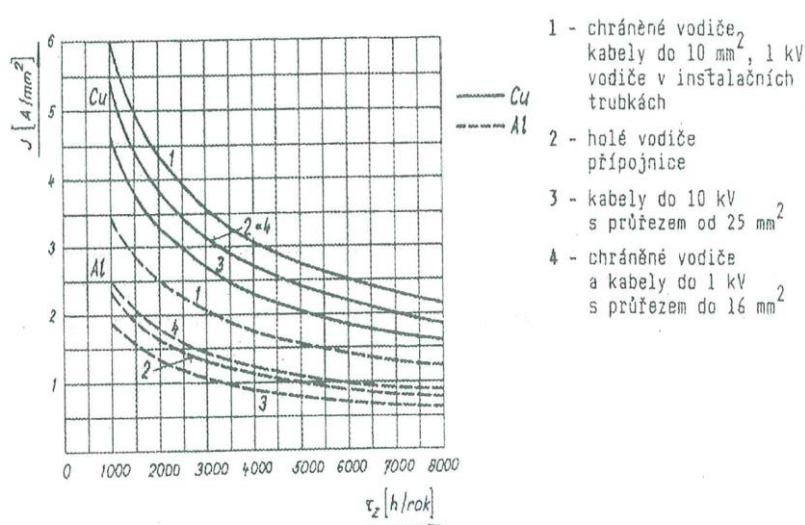
$$\tau_z = \frac{\int_0^T i^2(t)dt}{I_{max}^2} = T \left( \frac{\xi I_{ef}}{I_{stř}} \right)^2 \quad [3] \quad \xi = \frac{I_{stř}}{I_{max}} \text{ zatěžovatel } [-]$$

$I_{stř}, I_{ef}, I_{max}$  – hodnoty zatěžovacích proudů [A]  
 $\tau_z$  - doba plných ztrát [h/rok]  
 $T$  - doba [h] (3)

#### 4.1.1. Velikost hospodárného průřezu:

$$A = k I_v \sqrt{\tau_z} \quad [4]$$

$A$  – hospodárny průřez [mm<sup>2</sup>]  
 $k$  – součinitel závislý na druhu vodiče [mm<sup>2</sup>/A]  
 $I_v$  - výpočtový proud [A]  
 $\tau_z$  - doba plných ztrát [h/rok]



1. Závislost hospodárné proudové hustoty na době plných ztrát

(3)



#### 4.1.2. Dimenzování dle úbytku napětí na vodiči:

Pro spotřebitele je důležité, aby dostával přivedenou energii v dostatečné kvalitě. Určení zda je po vedení dostatečně malý úbytek napětí se spočte dle vztahů:

pro jednofázové soustavy:

$$\Delta U = \frac{2\rho l}{A} I \cos \varphi = \frac{2\rho l}{A} \frac{P}{U_f} \quad [6]$$

pro třífázové soustavy:

$$\Delta U = \frac{\rho l}{A} \sqrt{3} I \cos \varphi = \frac{\rho l}{A} \frac{P}{U_s} \quad [7]$$

$\rho$  - měrná rezistence vodiče na jednotku délky

[ $\Omega/\text{m}$ ]

$l$  – délka vodiče [m]

$A$  – průřez vodiče [ $\text{m}^2$ ]

$I$  – proud v jednom vodiči [A]

$\cos \varphi$  – účinník [-]

$P$  – výkon přenášený po vedení [W]

$U_f, U_s$  - fázové, sdružené napětí [V]

(3)

Hodnoty napětí musí být pro nízko napěťové sítě v rozsahu maximálně 10% od jmenovité hodnoty v 95 % času za rok. Krátkodobé dovolené snížení napětí pro jednotlivé hladiny napětí se liší. Pro jednotlivé hladiny jsou dovolené úbytky uvedeny v následující tabulce:

Hladina napětí [kV]	Minimální hodnota [%]	Maximální hodnota [%]
400	95	105
220 a 110	90	110
35	95	105
22	95	110
10 a 6	95	110
NN	95	105

##### 1. Dovolené úbytky napětí pro různé hladiny napětí

(4)

Rozdílné hodnoty dovolených úbytků napětí jsou i pro různé spotřebiče. Příklady jsou uvedeny v následující tabulce:

Přístroj	Minimální hodnota napětí [%]	Maximální hodnota napětí [%]
Motor	95	105
Tepelný spotřebič	95	105
Vnitřní osvětlení	97	105
Venkovní osvětlení	92	105
Relé	90	110
Stykače	85	110

##### 2. Dovolené úbytky napětí pro některé přístroje

(4)

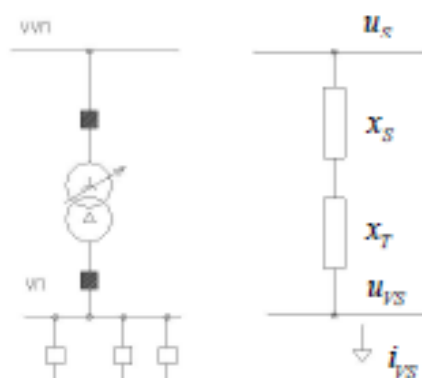
#### 4.2. Dimenzování transformátorů

Základním požadavkem na transformátory je změna hladiny napětí a z toho vycházející snížení proudu pro snížení ztrát na vedení, tedy pro snížení přenášeného proudu na dané

hladině napětí. Protože největší hodnota ztrát na vedení jsou Joulovy ztráty, které jsou závislé na kvadrátu proudu.

Pro návrh je důležité zvolení správného převodu, které je možné oproti základnímu převodu lehce změnit volbou odbočky výstupu. Transformátor je postaven a připraven s několika odbočkami, jejichž specifikace může být zapsaná například takto: 6/22  $2 \times \pm 2,5 \%$  kV. Toto znamená, že základní převod je z hladiny napětí 6 kV na hladinu 22 kV, která má celkem 5 možností převodu se změnou po 2,5 % od napětí 22 kV, tedy 2 výše nad 22 kV a 2 níže pod 22 kV.

### Volba převodu transformátoru:



2. Schéma transformátoru pro volbu převodu

Pro výpočet platí:

$$\hat{u}_s = j(x_s + x_T)\hat{i}_{VS} + \hat{u}_{VS} \quad [8]$$

$u_s$  – napětí sítě [-]

$u_{VS}$  – napětí vlastní spotřeby [-]

$i_{VSj}$  – proud vlastní spotřeby jalový [-]

$x_T$  - reaktance transformátoru [-]

$x_s$  - reaktance sítě [-]

Při zanedbání činného úbytku:

$$u_s = (x_s + x_T)i_{VSj} + u_{VS} \quad [9]$$

Převedeme ze vztažných jednotek:

$$\frac{U_s}{pU_V} = \left[ \frac{S_V}{S_{ks}} \left( \frac{U_s}{U_V} \right)^2 \frac{1}{p^2} + x_T \right] i_{VSj} + u_{VS} \quad [10]$$

$U_s$  – napětí sítě [V]

$U_V$  – napětí vztažné [V]

$i_{VSj}$  – proud vlastní spotřeby [-]

$u_{VS}$  – napětí vlastní spotřeby [-]

$x_T$  - reaktance transformátoru [-]

$x_s$  - reaktance sítě [-]

$p$  – převod [-]  
 $S_V$  – vztažný výkon [VA]  
 $S_{KS}$  – zkratový výkon sítě [VA]

Po úpravě vypočítáváme  $p$  jako kvadratickou rovnici:

$$0 = (x_T i_{VSj} + u_{VS})p^2 - p \frac{U_s}{U_V} + \frac{S_V}{S_{KS}} \left( \frac{U_s}{U_V} \right)^2 i_{VSj} \quad [11]$$

Pro výpočet potřebujeme znát:

$$x_T, i_{VSj}, U_s, S_{KS}$$

A zvolené napětí:

$$u_{VS}$$

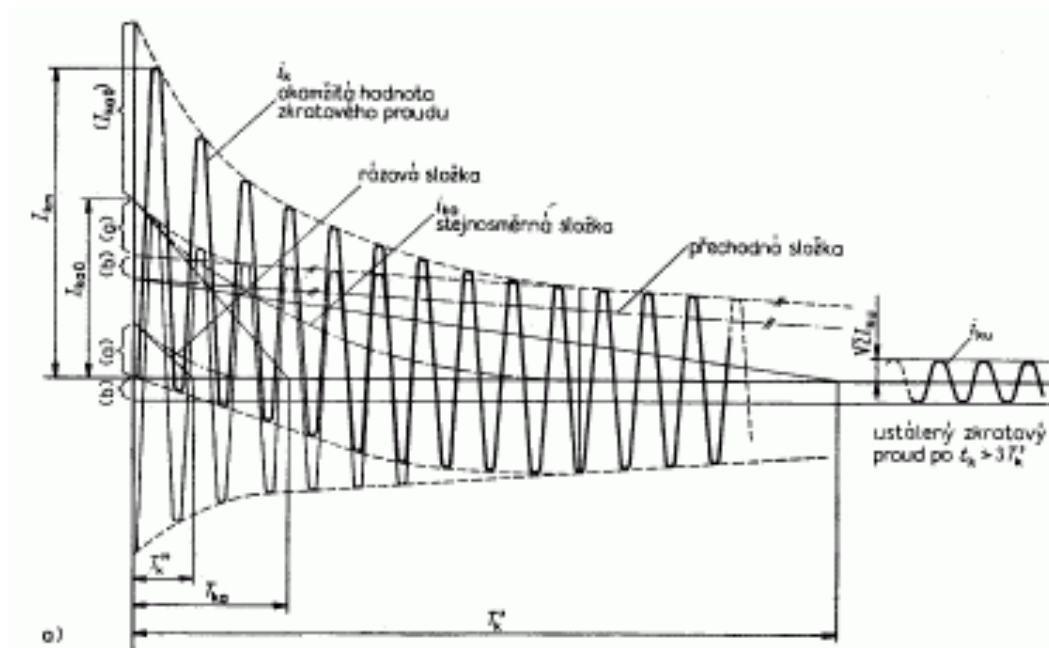
Po tomto výpočtu získáme dva kořeny, z nich jeden bude v blízkosti daného převodu transformátoru. Poté se zvolí jedna z odboček transformátoru, která je nejbližše vypočítané hodnotě převodu vyčítané. (5)

### 4.3. Návrh ochrany

Jednou z nejdůležitějších součástí návrhu jakékoli elektroinstalace je návrh elektrických ochran. Jedná se především o zvolení parametrů ochrany s ohledem na to, co chrání a jaký se může vyskytovat v daném obvodu proud.

Pro návrh ochrany je důležitý minimální zkratový proud, na který ochrana musí ještě reagovala proud, který musí chráněné zařízení po danou dobu vydržet bez poškození. Minimální vypínací proud je proud, který se může v obvodu vyskytnout a musí být vypnut ochranou zařízení i když je připojen jen minimální počet zdrojů zkratového proud. (6)

Dále uvedený postup je proveden pro návrh ochrany z hlediska poškození při maximálním zkratovém proudu.



**3. Průběh zkratového proudu**

(7)

Zkratový proud je složen ze tří složek, které s časem vymizí. Jedná se o složku rázovou, tedy nejvyšší hodnota proudu, kterou proud dosáhne. Dále složku přechodovou, jejíž vliv s časem mizí a složku stejnosměrnou. Velikost a průběh složek je ovlivněn okamžikem, kdy ke zkratu došlo a okamžité hodnotě proudu a napětí. Například kdyby byl počátek zkratu při maximu napětí, tedy nule proudu, stejnosměrná složka se vůbec neprojeví.

**Rázová složka:**

$$(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{T_d''}} \quad [12]$$

**Přechodová složka:**

$$(I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{T_d'}} \quad [13]$$

**Ustálená složka:**

$$I_k \quad [14]$$

$I_k$  - efektivní hodnota ustáleného proudu [A]

$I_k'$  - efektivní hodnota přechodového proudu [A]

$I_k''$  - efektivní hodnota rázového proudu [A]

$T_d'$  - přechodová časová konstanta [s]

$T_d''$  - rázová časová konstanta [s]

### Průběh zkratového proudu

$$i_k(t) = i_{st}(t) + i_a(t) = -\sqrt{2} \left[ (I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{T_d}} \cos \omega t + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{T_d}} \cos \omega t + I_k \cos \omega t - I_k'' e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \quad [15]$$

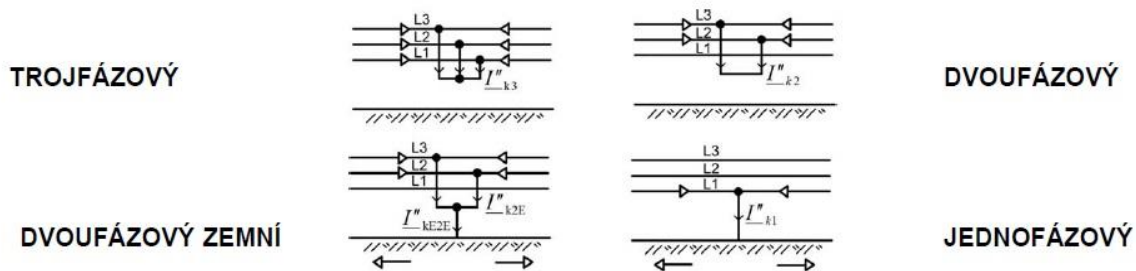
$i_k(t)$  – okamžitá hodnota zkratového proudu [A]

$i_{st}(t)$  - okamžité hodnota stejnosměrné složky proudu [A]

$i_a(t)$  - okamžité hodnota střídavé složky proudu [A]

(8)

Je několik druhů zkratů, které můžeme v síti očekávat. Základní druhy jsou: trojfázový, trojfázový zemní, dvoufázový, dvoufázový zemní a jednofázový zemní.



### 4. Druhy zkratů

Proudy vyvolané jednotlivými druhy zkratů se liší dimenzace ochran, musí být navržena tak, aby dané chráněné zařízení vydrželo nejvyšší možnou hodnotu proudu po dobu než zapůsobí ochrana a vypne vypínač. Návrh se proto vypočítává pro třífázový zkrat, který má nejvyšší hodnotu proudu, kterou při zkratu může dosáhnout. Nejčastější případ ovšem bývá jednofázový zkrat. Tedy navrhované součásti jsou dimenzovány na horší případ.

Výpočet se provádí pro konkrétní schéma, u kterého musíme znát parametry jednotlivých přístrojů ve schématu. Jako je napětí nakrátkou  $U_k$  použitých transformátorů, rezistencí  $x_v/km$  a délkou vedení, zkratový výkon soustavy  $S_s$ , do které je elektrárna vyvedená a vnitřní odpor generátorů  $x_g$ . Schéma je nutné převést na jednotky reaktance jednotlivých komponentů. Pro to je nutné si zvolit vztažné napětí  $U_{vz}$  a vztažný výkon  $S_{vz}$ . Nejlepší bývá zvolit tyto hodnoty odpovídající místu, kde je vypočítávaný zkrat. Dále je nutné tyto jednotky převést na výpočtové místo zkratu přes kvadrát převodu

transformátoru. Vypočte se celková reaktance soustavy dle pravidel součtu odporů  $x_{cel}$ . Pomocí vztažného výkonu vypočteme zkratový výkon soustavy dle vzorce:

$$S_{ks} = \frac{S_{vz}}{x_{cel}} \quad [16] \quad [\text{MVA}, \text{MVA}, -]$$

A ze zkratového výkonu spočteme počáteční zkratový proud dle vzorce:

$$I_{ks} = \frac{S_{ks}}{U_{vz} \cdot \sqrt{3}} \quad [17] \quad [\text{kA}, \text{MVA}, \text{kV}]$$

Nakonec vypočteme nárazový zkratový proud dle vzorce:

$$I_{km} = k \cdot I_{ks} \cdot \sqrt{2} \quad [18] \quad [\text{kA}, -, \text{kA}]$$

Místo zkratu		$k[-]$
Za alternátory do 55 MW		1,95
V soustavě VVN, ZVN		1,7
V soustavě VN		1,6
V soustavě NN		1,4
V kabelovém rozvodu NN		1,3
Za transformátory	VVN/VN nebo VN/NN	1,7
	VN/NN do 250 kVA včetně	1,3
	VN/NN do 630 kVA včetně	1,5
	VN/NN do 1600 kVA včetně	1,6

**3. Tabulka součinitele  $k$  pro výpočet nárazového zkratového proudu**

(9)

Teoretický vzorec pro výpočet součinitele  $k$  pro frekvenci 50 Hz.

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad [19]$$

$R$  – odpor  $[\Omega]$

$X$  – reaktance  $[\Omega]$

#### **4.3.1. Rozdělení ochran synchronních generátorů:**

**nadproudová ochrana** – chrání generátor před přetížením s nastavením na  $1,3 \div 1,5$  jmenovitého proudu s nastavenou dobou působení  $5 \div 10$  s.

**rozdílová ochrana** – chrání generátor před zkratem mezi vinutími fází, vinutí generátoru jsou zapojena do hvězdy a ve sledované fázi se porovnávají proudy na obou koncích vinutí dané fáze. Při překročení povolené hodnoty  $\Delta I$  dojde k odpojení generátoru, jeho odbuzení a zastavení turbíny (na stejném principu pracuje proudový chránič).

**závitová ochrana** – chrání stroj před důsledky mezi závitového zkratu – porovnávají se napětí jednotlivých fází,

**zemní ochrana statoru** – vybaví při porušení izolace vinutí statoru proti zemi – snímá se napětí mezi uzlem hvězdy statoru a zemí, velikost tohoto napětí je závislá na vzdálenosti zkratu od středu vinutí.

**zemní ochrana rotoru** – signalizuje jednoduché zemní spojení rotorového vinutí s kostrou,

**napěťová ochrana** – chrání generátor před přepětím nebo případným podpětím (jeho důsledkem je následné přetížení generátoru),

**zpětná wattová ochrana** – ochrana před zpětným výkonem ze sítě, např. při poklesu výkonu turbíny kdy přejde generátor do motorického stavu což je ve vztahu k síti nežádoucí,

**ochrana proti přehřátí** – hlídá jednotlivé části generátoru před zvýšením teploty nad mezní hodnotu, nejčastěji se do vinutí vkládají tepelná čidla,

**ochrana proti požáru** – při dosažení limitních teplot, které jsou vyhodnoceny jako požár generátoru je možno generátor hasit vhaňením CO<sub>2</sub> do místa požáru. Pro indikaci požáru se mimo teplot používají i snímače kouře nebo záblesku.

**ochrana při elektrickém brzdění generátoru** – při odpojení o síť se generátor může brzdít mechanicky nebo z počátku při i elektricky. Při elektrickém brzdění se stator spojí nakrátko a buzení rotoru se nastaví tak, aby vinutím statoru zapojeného nakrátko protékal jmenovitý proud. Jako ochrana při elektrickém brzdění se používá nadproudová ochrana v napájecím obvodu buzení.

#### **4.4. Dimenzování rozvaděčů**

Rozvaděče jsou nedílnou součástí každé elektroinstalace.

Rozvaděče je nutno dimenzovat především v prvním kroku dle hladiny napětí, na kterém se nacházení a dle celkového proudu, který může v rozvaděči procházet. Jinými slovy dle hodnoty maximálního soudobého výkonu, který se může vyskytnout. Pro výpočet velikosti proudů se použije obdobný postup jako v kapitole 4.5.

Dále se jedná o návrh dostatečného místa v rozvaděči pro jednotlivé komponenty (jističe, chrániče a další). Při návrhu se musí počítat i s dostatečnou dispoziční rezervou jak pro návrh obsazení instalovaných jističů, kde je obvyklé, že se přidává rezerva 20 %, tak pro celkový prostor v rozvaděči, ten se navyšuje o zhruba 10 %.

Další nutná kontrola pro návrh rozvaděče je zhodnocení oteplení vlivem protékajícího proudu. A návrh eventuálního chlazení pro daný rozvaděč. Pro výpočet otelení se využívá norma ČSN IEC 890.

(10)

#### **4.5. Návrh velikosti napájecího zdroje pro konečného odběratele:**

V místě odběru se celý výkon, který by bylo možné odebírat, nikdy nebude vyskytovat. Z tohoto důvodu se součet všech výkonů spotřebičů sníží skrze koeficienty současnosti a zatížitelnosti.

Koeficient současnosti  $k_s$  se určuje jako poměr sumy jmenovitých výkonů současně připojených spotřebičů a celkového instalovaného výkonu všech spotřebičů dle následujícího vztahu:

$$k_s = \frac{\sum P_{ns}}{\sum P_n} \quad [20] \quad [-, kW, kW]$$

Koeficient zatížitelnosti  $k_z$  se udává jako poměrné zatížení současně připojených spotřebičů dle vztahu:

$$k_z = \frac{\sum P_s}{\sum P_{ns}} \quad [21] \quad [-, kW, kW]$$

Tyto koeficienty dohromady určí tzv. náročnost  $\beta$  podle rovnice:

$$\beta = \frac{k_s * k_z}{\eta_m * \eta_s} = \frac{1}{\eta_m * \eta_s} \frac{\sum P_s}{\sum P_n} \quad [22]$$

, kde  $\eta_m$  účinnost spotřebičů při daném využití [-]  
 $\eta_s$  účinnost napájecího systému [-]  
 $P_s$  skutečné zatížení současně připojených spotřebičů [kW]

Pomocí uvedené náročnosti  $\beta$  určíme skutečné (výpočtové) zatížení  $P_v$ , ze kterého vyplyne velikost napájecího zdroje. Dále se dle této hodnoty zatížení určuje průřez napájecích vodičů, velikost spínacích přístrojů, měřících přístrojů, elektrických ochranných a dalších rozvodných zařízení.

(3)

#### 4.6. Výpočtové zatížení nehomogenní skupiny spotřebičů:

Určení výpočtového zatížení pro skupinu spotřebičů přibližně stejných výkonů. Pro další spotřebiče značně se odlišující svým výkonem (například o jeden či více řádů) od dané skupiny je nutné uvažovat zvlášť.

Označíme součet odpovídajících výkonů spotřebičů  $P_x$  (kW) a odpovídající náročnost těchto spotřebičů  $\beta_x$ , pak celkový součet instalovaných výkonů spotřebičů včetně  $P_x$  je  $P_i = \sum P_n$  a odpovídající náročnost celé skupiny je  $\beta_i$ . Pak výpočtové zatížení je dán vztahem:

$$P_v = \beta_x * P_x + \beta_i * P_i \quad [23] \quad [kW, -, kW, -, kW]$$

Dále je doporučeno u malých skupin spotřebičů provést kontrolu součtu dvou nebo tří největších jmenovitých příkonů spotřebičů. Pokud je jejich součet vyšší než výpočtové zatížení je třeba takové zatížení korigovat alespoň na velikost součtu zmíněných dvou nebo tří největších spotřebičů skupiny.

Z určeného výpočtového zatížení  $P_v$  zjistíme výpočtový proud spotřebiče dle vztahů:

Pro jednofázové:

$$I_{v1} = \frac{P_v * 10^3}{U * \cos \varphi} \quad [24]$$

[A; kW, V, -]

Pro vícefázové:

$$I_{v3} = \frac{P_v * 10^3}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} \quad [25]$$

[A; kW, V, -]

Pro stejnosměrné:

$$I_{vss} = \frac{P_v * 10^3}{U} \quad [26]$$

[A; kW, V]

(3)

## 5. Varianty vyvedení výkonu – vliv na distribuční síť

Pro výpočet vlivů na distribuční síť byl využit program VLIVY EGC, který pro výpočty používá Newton-Rapshnovu metodu. Na výběr jsou i pro jednorozměrný výpočet stavu sítě metody Gauss-Seidlova nebo metoda uzlových napětí. S pomocí tohoto programu lze



vypočíst stav sítě, vliv na HDO, zkratové poměry v síti nebo ztráty v síti. Dále jsou popsány metody výpočtu pro vypočtení stavu sítě při zadaných parametrech.

Pro zjištění vlivů na distribuční síť je nutné použít některou z výpočtových systémů pro parametry sítě. Pro daný výpočet musíme znát parametry sítě v okolních bodech. Lze rozeznávat druhy uzlů, které mohou být v kombinaci známých hodnot napětí, argument napětí, činný výkon a jalový výkon. Nejpoužívanější uzly jsou uvedeny v tabulce 5.

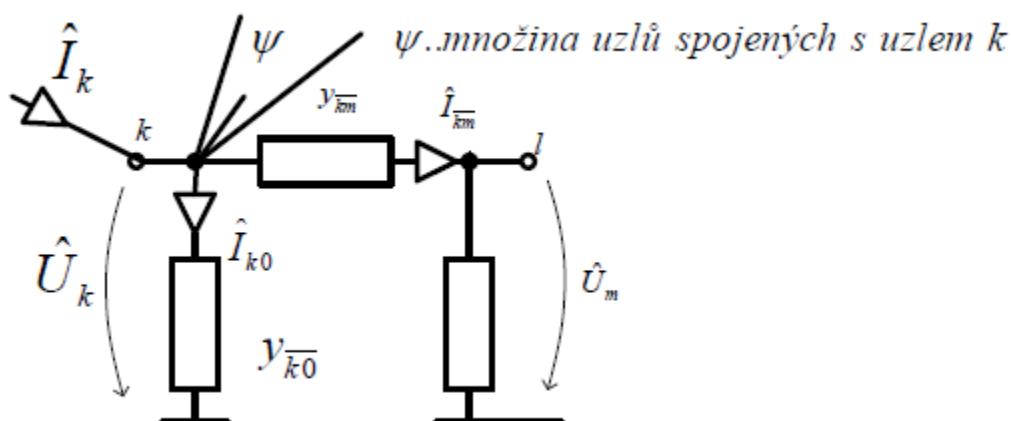
Typ uzlu Index	Realizace uzlu	Modul Abs U	$\angle$ Arg U	P Real S	Q Imag S
U $\angle$ -0-	Bilanční uzel-slack Velký zdroj	známý	0	-	-
PU -i-	Generátorické uzly s funkční regulací napětí	známý	-	známý	-
PQ -k-	Zátěžné uzly Gen. Uzly na mezi	-	-	známý	známý

4. Tabulka uzlů

(11)

Pro výpočet neznámých parametrů sítě lze použít například Gauss-Seidel či Newton-Raphson přístup. Pro každý přístup je nutný výpočet pomocí počítače. Každý přístup je při použití přesný do určité míry. Je schopný vypočíst stav v síti při daných parametrech. Přístupy jsou založeny na možnosti výpočtu v krocích, ve kterých se přibližují ke skutečnému stavu.

Pro výpočet jednotlivých parametrů sítě je potřeba znát výpočtové vzorce pro výkon a napětí. Dále je důležitý úhel zátěže. Příklady výpočtu jsou uvedeny u každé z metod.



5. Výpočet ustáleného chodu

$$\hat{I}_k = \hat{U}_k * y_{k0} + \sum_{m \in \psi} (\hat{U}_k - \hat{U}_m) y_{km} \quad [27]$$

$$\hat{I}_k = \hat{U}_k * (y_{k0} + \sum_{m \in \psi} y_{km}) + \sum_{m \in \psi} \hat{U}_m (-y_{km}) \quad [28]$$

$$\widehat{Y_{(k,k)}} = Y(k,k)e^{j\gamma_{kk}} \quad [20] \quad \widehat{Y_{(k,m)}} = Y(k,l)e^{j\gamma_{kl}} \quad [29]$$

Vytvoření admitanční matice:

$[Y]$ .. Admitační matice

$\bar{U}, \bar{\delta}$ ... vektor modulů a úhlů uzlových napětí

$\bar{I} = [Y] \cdot \bar{U}$ ...vektor uzlových proudů [30]

Matice je vyvářena z admitančních hodnot mezi jednotlivými uzly a na diagonále jsou dosazovány hodnoty pro daný uzel vůči zemi.

Hodnoty uzlových proudů a výkonů.:

$$\bar{S} = \text{diag} \bar{U} [Y^*] \bar{U}^* = \bar{P} + j\bar{Q} \dots \text{uzlové výkony} \quad [31]$$

$$\hat{S}_k = \hat{U}_k * \hat{I}_k^* = U_k^2 \hat{Y}_{(k,k)}^* + \sum_{m \in \psi} \hat{U}_k \hat{U}_m^* \hat{Y}_{(k,m)}^* \quad [32]$$

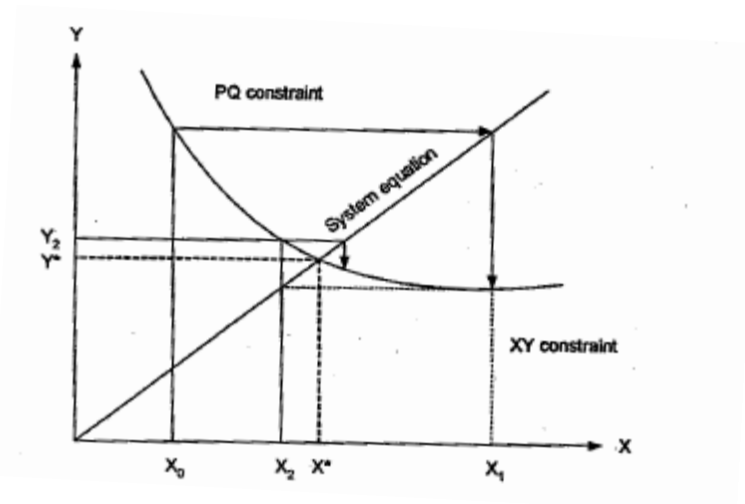
$$\hat{S}_k = U_k \sum_{m \in \psi} U_m Y(m,k) e^{j(\delta_{km} - \gamma_{km})} \quad [33]$$

Pro výpočet stavu sítě je nutné znát rovnice výkonů. Do těchto rovnice se dosazují hodnoty napětí a jejich úhlů. Tyto rovnice se využívají v obou metodách pro výpočet stavu sítě.

(11)

### 5.1. Gauss-Seidelova metoda

Přístup je založen na zlepšování odhadu pomocí lineárního zpracování. Metoda je určena pro nelineární rovnice. Ne vždy má dobrou konvergenci. Zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku 6.



### 6. Gauss-Seidelova metoda

Metoda je založena na vyjádření jedné z neznámých v závislosti na ostatních neznámých.

$$\begin{aligned}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\
&\dots\dots\dots \\
a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n [34]
\end{aligned}$$

Výpočet se převede do tvaru:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1n}x_n) \\
x_2 &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1 - \dots - a_{2n}x_n) \\
&\dots\dots\dots \\
x_n &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1 - \dots - a_{nn-1}x_{n-1}) [35]
\end{aligned}$$

Z toho získáme iterační formuli ve tvaru:

$$\begin{aligned}
x_1^{k+1} &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^k - \dots - a_{1n}x_n^k) \\
x_2^{k+1} &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^k - \dots - a_{2n}x_n^k) \\
&\dots\dots\dots \\
x_n^{k+1} &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^k - \dots - a_{nn-1}x_{n-1}^k) [36]
\end{aligned}$$

Z každé zadané rovnice se určí jedna neznámá a tu vyjádříme. Po zvolení ostatních neznámých se určená neznámá vypočte. V dalším kroku se tato neznámá dosadí do následující rovnice a vypočítává se další neznámá. Takto se postupuje u všech neznámých. Poté se výpočet opakuje od počátečních rovnic s vypočtenými neznámými. Výpočet se postupně zpřesňuje. Zhodnocení přesnosti výpočtu se provádí výpočtem absolutní hodnoty vyjádřené neznámé v současném a minulém kroku. Pokud se tato hodnota menší než zadaná přesnost výpočet končí.

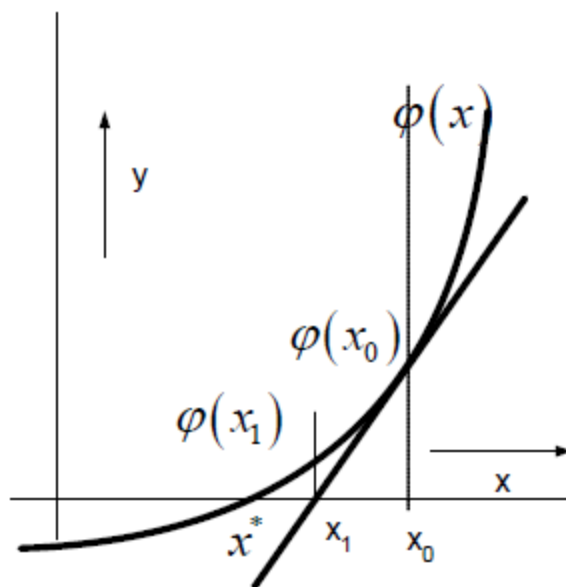
$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon \quad [37]$$

Druhá možnost kdy metoda může skončit je po určeném počtu kroků.

(11)

## 5.2. Newton-Raphsonova metoda

Přístup je založen na zlepšování odhadu za pomoci Taylorovy řady a s tím spojené derivace. Pro řešení nelineárních rovnic je tato metoda nejrozšířenější. Řešení převádí nelineární rovnice na řešení lineárních. Pro zjednodušení vysvětlení se používá jednorozměrný výpočet znázorněný na obrázku 7.



7. Newton-Raphsonova metoda

Základní úvaha:

$$f(x) = c \quad [38]$$

Počítáme s počátečním odhadem  $x^0$  a odchylkou od správného řešení  $\Delta x^0$

$$f(x^0 + \Delta x^0) = c \quad [39]$$

Taylorova řada:

$$f(x)_{x_0} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{df(x_0)}{dx}\right)^k}{k!} (x - x_0)^k \quad [40]$$

Rozvojem dostaneme:

$$f(x^0) + \left(\frac{df}{dx}\right)^0 \Delta x^0 + \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^0 (\Delta x^0)^2 + \dots = c \quad [41]$$

Linearizme zanedbáním vyšších řádů:

$$\Delta c^0 \approx \left(\frac{df}{dx}\right)^0 \Delta x^0 \quad [42]$$

Z tohoto definujeme tzv. defekt:

$$\Delta c^0 = c - f(x^0) \quad [43]$$

Přičtením defektu k počátečnímu odhadu získáme druhou aproximaci:

$$x^1 = x^0 + \frac{\Delta c^0}{\left(\frac{df}{dx}\right)^0} \quad [44]$$

Stejnými vztahy v dalších krocích získáme algoritmus metody:

$$\Delta c^k = c - f(x^k) \quad [45]$$

$$\Delta x^k = \frac{\Delta c^k}{\left(\frac{df}{dx}\right)^k} \quad [46]$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad [47]$$

$$\Delta c^{k+1} = c - f(x^{k+1}) \quad [48]$$

Používané 0 a 1 znázorňují čísla současné respektive následující iterace.

Pro výpočet vícerozměrného případu se využívá zadání jednotlivých systémů zadaných do vektorů.

$$\begin{pmatrix} c_1 - (f_1^0) \\ c_2 - (f_2^0) \\ \vdots \\ c_n - (f_n^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{pmatrix} \quad [49]$$

Zkráceně napsáno získáme tzv. Jacobiho matici J:

$$(\Delta c^0) = (J^0)(\Delta X^0) \quad [50]$$

Potom potřebujeme vypočíst změny hodnot X, tedy pomocí invertované Jacobiho matice:

$$(\Delta X^0) = (J^0)^{-1}(\Delta c^0) \quad [51]$$

Algoritmus metody tedy vychází:

$$(\Delta c^k) = \begin{pmatrix} c_1 - (f_1^k) \\ c_2 - (f_2^k) \\ \vdots \\ c_n - (f_n^k) \end{pmatrix} \quad [52]$$

$$(\Delta X^k) = (J^k)^{-1}(\Delta c^k) \quad [53]$$

$$(X^{k+1}) = (X^k)(\Delta X^k) \quad [54]$$

$$(\Delta c^{k+1}) = \begin{pmatrix} c_1 - (f_1^{k+1}) \\ c_2 - (f_2^{k+1}) \\ \vdots \\ c_n - (f_n^{k+1}) \end{pmatrix} \quad [55] \quad \text{kde} \quad (\Delta X^{k+1}) = \begin{pmatrix} \Delta x_1^k \\ \Delta x_2^k \\ \vdots \\ \Delta x_n^k \end{pmatrix} \quad [56]$$

$$(J^k) = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^k & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^k \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^k & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^k & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^k \end{pmatrix} \quad [57]$$

Pro výpočet ustáleného chodu sítě je nutné znát parametry sítě. Rovnice napětí a proudu lze rozšířit do tvaru pro závislost mezi napětím a výkonem.

$$\hat{I}_k = \sum_{m=1}^n \hat{U}_{fm} \hat{Y}_{(k,m)} \quad [58]$$

$$\hat{S}_k = 3\hat{S}_{fk} = 3\hat{U}_{fk} \hat{I}_k^* = 3\hat{U}_{fk} \sum_{m=1}^n \hat{U}_{fm}^* \hat{Y}_{(k,m)}^* \quad [59]$$

$$\hat{S}_k = \hat{U}_k \sum_{m=1}^n \hat{U}_m^* \hat{Y}_{(k,m)}^* \quad [60]$$

V maticovém zápisu:

$$(\hat{S}) = (\hat{U}_{diag})(\hat{Y}^*)(\hat{U}^*) \quad [61]$$

Tento výpočet se používá pro symetrické systémy i jeho zatížení tedy jednofázové modely. Cíl metody je určení  $P, Q, U$  a  $\alpha$  v uzlech a větvích.

$$\hat{S}_i = \hat{U}_i \sum_{j=1}^n \hat{U}_j^* \hat{Y}_{(i,j)}^* = \hat{U}_i^2 \hat{Y}_{(i,i)}^* + \hat{U}_i \sum_{j=1}^n \hat{U}_j^* \hat{Y}_{(i,j)}^* \quad [62]$$

Pro úplný zápis rovnic pro řešení stavu sítě získáme dle rovnic:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad [63]$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \quad [64]$$

#### Nástin iteračního řešení:

V prvním kroku se navolí první odhady pro jednotlivá napětí a jejich úhly. Pro nejlepší základ bývá odhad pro napětí hodnota 1 jmenovité jednotky a úhel  $0^\circ$ .

$$\begin{bmatrix} \delta \\ U \end{bmatrix}_k \quad [65]$$

Dalším krokem je výpočet tzv. defektu, který je definován jako:

$$\text{Defekt} \quad \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad [66]$$

Tato hodnota se dosadí do pro výpočet hodnot rozdílu napětí a úhlu za pomoci transformované Jakobiho matice:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad [67]$$

Pro skutečné hodnoty dosadíme tyto rozdíly jako součet s prvotně zadanými hodnotami:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ U \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ U \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad [68]$$

Při zpracovávání se algoritmus opakuje do chvíle, kdy se hodnoty ve dvou po sobě následujících krocích neliší o víc než předem definovaný rozdíl. (11)

### 5.1. Využití metod

Při výpočtech stavu sítě byla využita metoda Newton-Raphson jenž je využita v programu EVlivy. Program byl využit pro výpočet stavu sítě při odpojení elektrárny, zapojení jednoho generátoru a zapojení obou generátorů do nového připojení. Kontrola byla provedena pro útlum HDO, která nemůže být nižší než 20 %. Kontrola připojitelnosti má omezení pro změnu napětí maximálně o 2 %.

Konkrétní zhodnocení je uvedeno v **Příloze 18: Studie připojitelnosti**.

## 6. Identifikace provozu do vyčleněné sítě

Ostrovní provoz je provoz zdrojů do části vyčleněné sítě odpojené od distribuční sítě. Vznik ostrovního provozu může nastat při poruše, kdy dojde k vypnutí vedení nebo chybou transformátorů, chybnou manipulací nebo působením ochran. Postižená část sítě ztratí synchronní spojení se zbytkem soustavy a pracuje asynchronně. Druhý způsob vzniku ostrovního režimu je záměrnou činností při obnově soustavy z blackoutu, tedy startu ze tmy. V tomto případě rozběhu soustrojí znamená obnovení vlastní spotřeby dalších bloků, jejich napětí a postupném zatěžování.

Ostrovní režim může být ukončen synchronizací a přiřazováním ke zbytku soustavy. Přiřazování se provádí pomocí automatických synchronizačních zařízení. Tato zařízení kontrolují plnění fázovacích podmínek:

- Stejný sled fází – systémy mají stejný smysl otáčení (při nesouladu je nutné zaměnit 2 fáze)

- Stejná frekvence – oba systémy se otáčejí stejně rychle. Frekvence synchronního stroje je nastavena otáčkami turbíny
- Stejně napětí – napětí synchronního stroje se mění budícím proudem
- Stejný fázový posun – sinusové průběhy napětí se překrývají. V případě nesouhlasu fází se musí synchronní stroj pomocí změny frekvence urychlit a po dosažení požadované shody zpětně zpomalit, aby se frekvence opět rovnala.

Porovnání obou dvou systémů je v následující tabulce:

	Synchronní provoz	Ostrovní provoz
Udržování výkonové rovnováhy	Komplexní systémová služba zajištěná provozovatelem ES	Regulace otáček turbín, součinnost provozovatelů sítě a elektráren, frekvenční odlehčování
Primární pokrytí $\Delta P$	Primární regulace $f$	Proporcionální regulace otáček, frekvenční odlehčování
Sekundární pokrytí $\Delta P$	Sekundární regulace $f$ a $P$	Změna základního otevření, změna zatížení, centrální regulace frekvence

#### 5. Srovnání synchronního a ostrovního provozu a pokrývání nerovnováhy $\Delta P$

(12)

Rozdíl mezi těmito dvěma provozy je, že v případě synchronního propojení je možnost spolehnout se na síť pro oblast regulací. Naopak při ostrovním provozu se spoléhá pouze na svůj zdroj. Tento provoz lze vyjádřit rovnicí:

$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \quad [69]$$

$\sum P_G$  - suma činných výkonů dodávaných generátory

$\sum P_S$  - suma činných zatížení ostrova včetně vlastní spotřeby elektráren

$\sum P_Z$  – celkové ztráty v sítích

Frekvenční omezení pro vodní elektrárnu:

Provoz	Hranice frekvence [Hz]	
Normální bez omezení	48.5-50.5	
Časově omezen	46-48.5	50.5-53
Nepřístupný	<46	>53
Automatické odpojení od ES	<47.5	>50.2(51.5)

#### 6. Vymezení frekvence pro pásma provozu

(12)

#### Změna zatížení

V případě generátorového chodu v nadsynchronních otáčkách při připojení k distribuční síti dodává tento generátor do sítě činnou energii. Zvýšení momentu na hřídeli má za následek zvýšení otáček a tím i zvýšení proudu generátorem.



V opačném případě chodu, tedy v podsynchronních otáčkách. Se moment na hřídeli sníží to má za následek snížení otáček a tím i snížení proudu generátorem.

Pro identifikaci stavu sítě se používají systémy Loss Of Mains – LOM nebo ROCOF stability.

## 6.1. Loss Of Mains (LOM)

Metoda je založena na kontrole výkonu odebíraného z elektrárny. Metoda by měla být dostatečně citlivá za všech možných zatížení a scénářů generace. Nejnáročnější scénář je při lokálním zatížení blízko následuje za výstupem generátoru. Toto platí pro činný i jalový výkon. Při této metodě je nebezpečí zbytečného opojení generátoru. Toto nastává při chybné cestě.



8. Metoda LOM citlivost

(13)

### 6.1.1. Metoda ROCOF

ROCOF rozepsaně Rate Of Change Of Frequency. Česky rychlost změny frekvence.

Metoda je založena na lokálním měření napětí generátoru a odhadu rychlosti změny frekvence. Naměřená rychlost změny frekvence je přímo úměrná množství činné energie nerovnováhy mezi místní zátěží a výkonu generátoru. Jedná se o aktivní metodu.

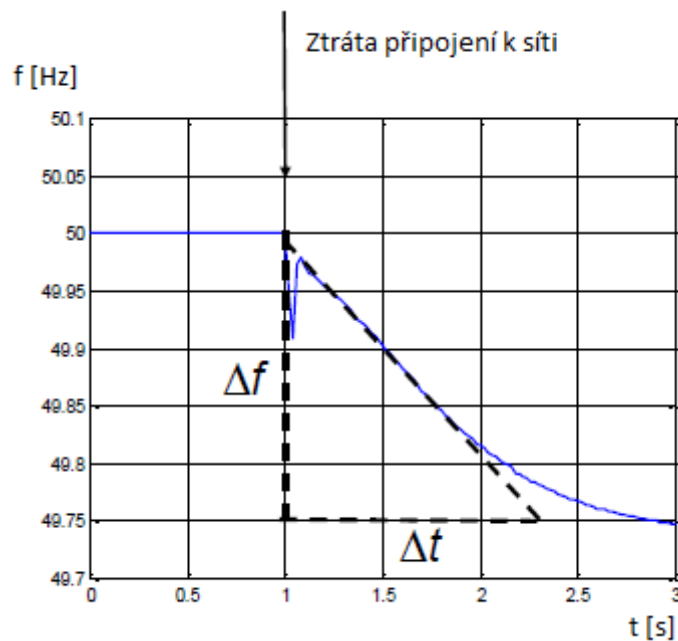
$$ROCOF = \frac{\Delta P \cdot f}{2 \cdot S_n \cdot H} \quad [70]$$

$\Delta P$  - rozdíl činných výkonů [MW]

$f$  - frekvence [Hz]

$S_n$  – jmenovitý výkon generátoru [MVA]

$H$  – setrvačná konstanta generátoru [s]



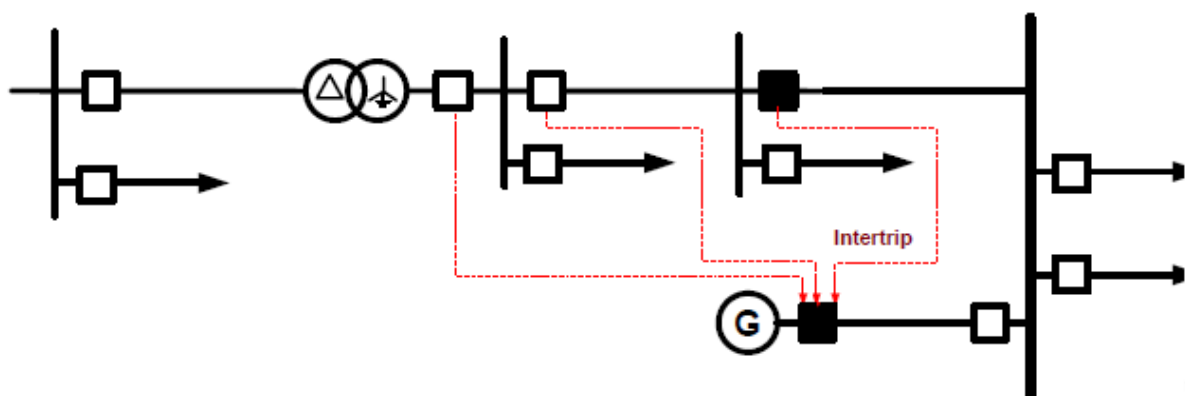
9. Příklad změny frekvence při ztrátě připojení k síti

$$ROCOF = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad [71]$$

Metoda nevyžaduje komunikaci s poruchou. Obecně poskytuje dobrou citlivost na událost v ostrovním režimu, ale má malé pásmo neodhalení. Může nastat případ chybné detekce v průběhu vzdálených systémových poruch.

#### 6.1.1.1. Přímá kontrola vypnutí

Metoda je založena na posílání stavu vypínačů přímo ke všem generátorům, které mohou podpořit ostrovní režim. Metoda není závislá na žádných měření. Operace je téměř okamžitá. Použitá komunikace může být pevnou linkou či rádiiem pro vzdálenost do 10 km, mikrovlnami do vzdálenosti 20 km, PLC do vzdálenosti 100 km, optickými kabely na vzdálenost 20-50 km nebo měděným kabelem do vzdálenosti 10 km. Nevýhodou je vysoká cena pořízení.

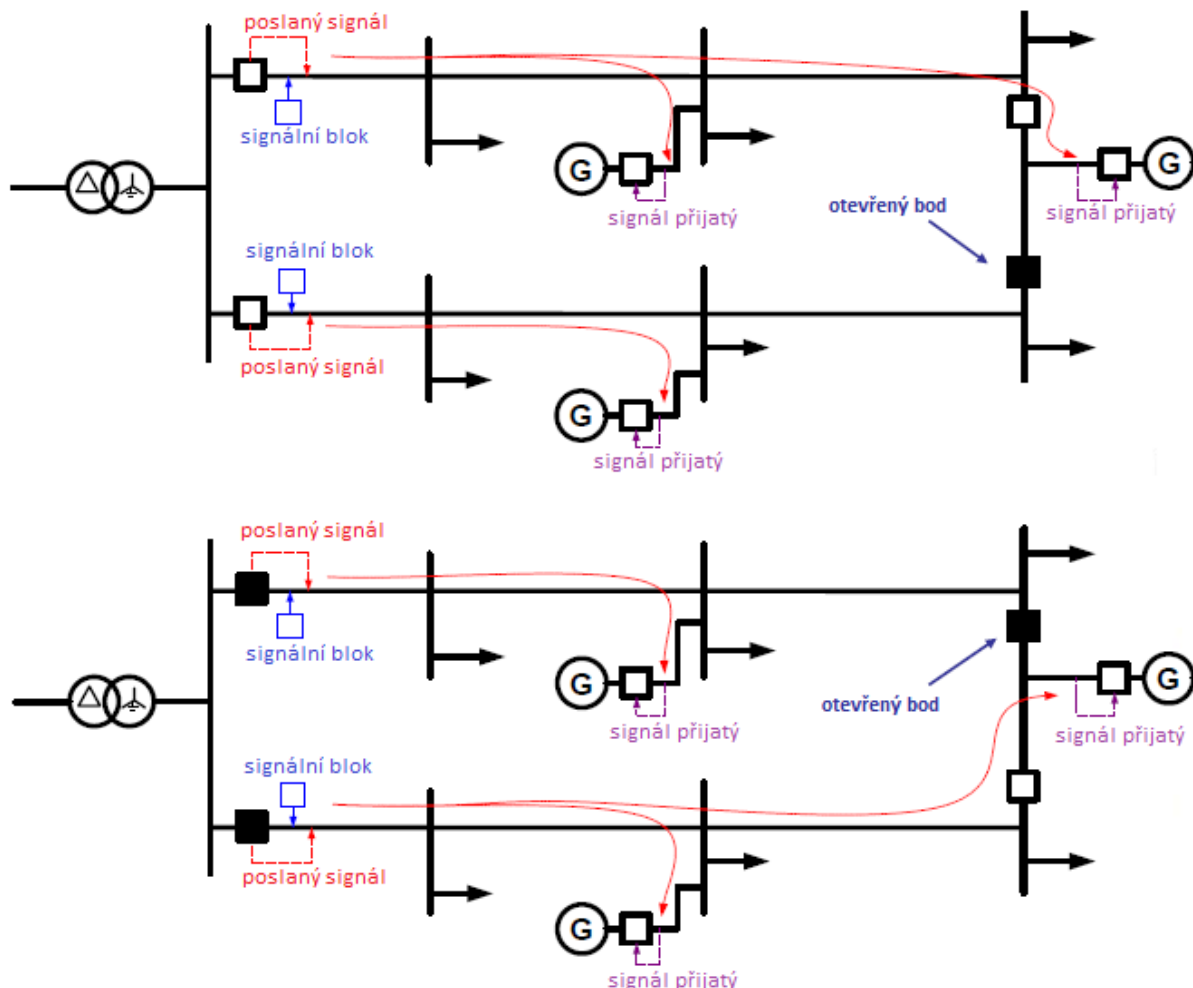


10. Přímá kontrola vypnutí

(13)

### 6.1.1.2. *Přímé měření otevřených kruhových sítí*

Tato metoda je založena na posílání signálu přes vedení a jeho detekci u generátoru. Metoda používá k posílání signálu PLC techniku. Signál je vždy doručen ke generátoru bez ohledu na polohu otevřeného bodu.



11. Přímé měření otevřených kruhových sítí

(13)

### 6.1.2. *Metoda vektorového skoku*

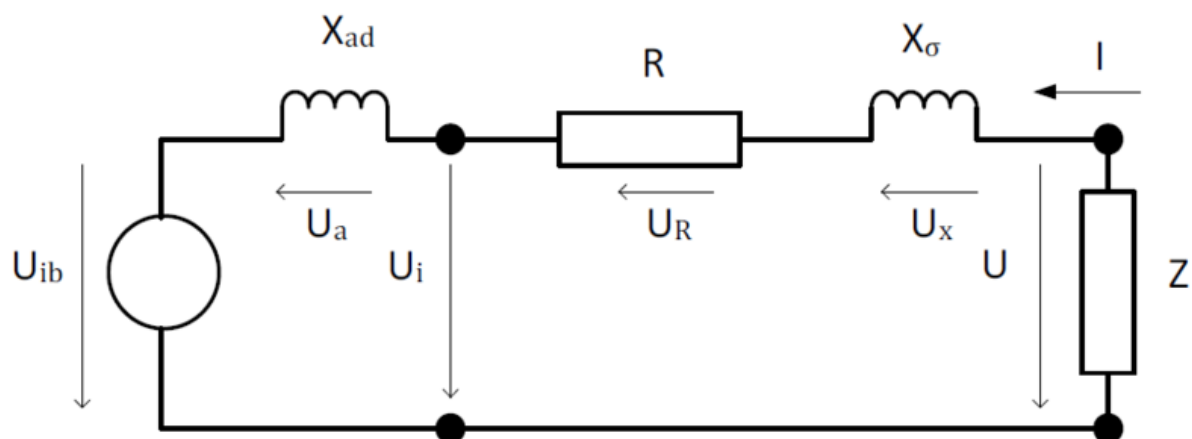
Metoda měří okamžitou změnu úhlu u trojfázového napětí, která se vyskytuje v případě ztráty spojení s hlavní částí sítě. Algoritmus pracuje bez jakéhokoli zpoždění.

Úhlová měření se provádí pro všechny tři fázová napětí. Rozdílový úhel se počítá z rozdílu času mezi současným a minulým průchodem napětí nulou. Měření je opakováno pro celou periodu. To nám dává za periodu šest výsledků. Pokud pět z těchto výsledků je mimo nastavené hranice zahájí se vypínání. Vzhledem k tomu, že vektorový skok porovnává dvě po sobě jdoucí výsledky čas vypnutí je přibližně 30 msec. Vzhledem k měření na všech třech fázích značně se snižuje možnost chyby od harmonického zkreslení a rušení. Zlepšuje stabilitu a snižuje pravděpodobnost chybného vypnutí nesymetrické závady.

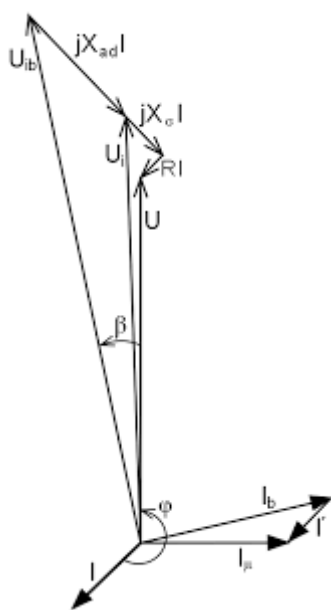
(14)

## 7. Stabilita provozu do vyčleněné sítě a při provozu paralelně se sítí v podbuzeném stavu

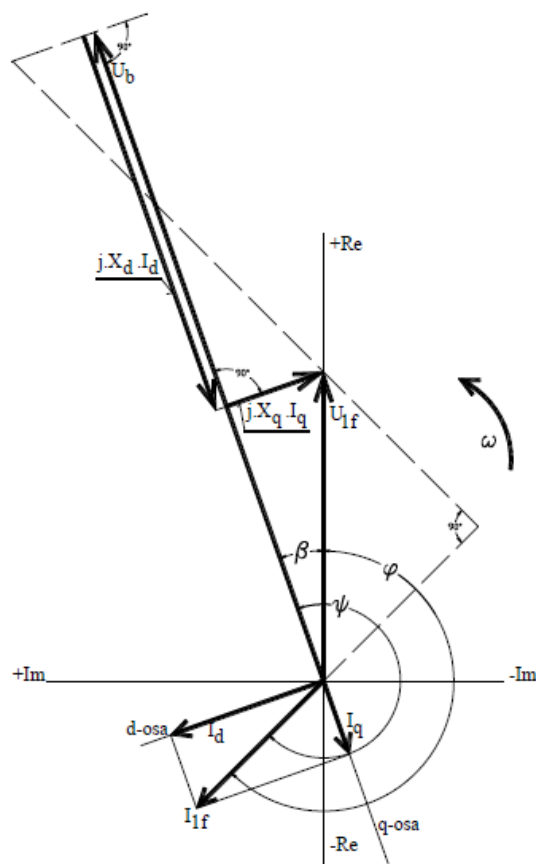
Stabilita chodu synchronního alternátoru je dána synchronizačním výkonem, který stroj udržuje v synchronním chodu. Protože synchronizační výkon se mění se zatížením a to tak, že v chodu naprázdno je největší, naopak na mezi statické stability je nulový.



12. Náhradní schéma synchronního stroje



13. Vektorový diagram synchronního stroje s hladkým rotorem



**14. Vektorový diagram synchronního stroje a vyniklými póly**

Pro výpočet stability je uvažováno se strojem s vyniklými póly, který se liší od stroje s hladkým rotorem především velkým rozdílem ve velikosti podélné reaktance  $X_d$  a příčné  $X_q$ . U strojů s hladkým rotorem tento rozdíl činí zhruba 15 %. (15)

Vyjdeme ze základní rovnice pro výkon stroje:

$$P = m U_{1f} I_{1f} \cos \varphi \quad [72]$$

$P$  – výkon [W]  
 $m$  – počet fází [-]  
 $U_{1f}$  – napětí 1 fáze [V]  
 $I_{1f}$  – proud 1 fáze [A]  
 $\cos \varphi$  – účinník [-]

Upravíme dle vektorového digramu:

$$P = m \left( \frac{U_{1f} U_b}{X_d} \sin \beta + U_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\beta \right) \quad [73]$$

$U_b$  – napětí buzení[V]  
 $X_d$  - reaktance podélná[Ω]  
 $X_q$  - reaktance příčná[Ω]  
 $\beta$  – úhel zátěžný[°]

(15)

Reluktanční výkon synchronního stroje, tedy nenabuzeného  $U_b = 0$

$$P = mU_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \quad [74]$$

Z toho vychází maximální reluktanční výkon pro  $\beta = 45^\circ$

$$P = mU_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \quad [75]$$

Moment synchronního stroje s vyniklými póly:

$$M = \frac{mp}{2\pi f} \left( \frac{U_{1f} U_b}{X_d} \sin \beta + U_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right) \quad [76]$$

$M$  – moment [Nm]  
 $p$  – počet pól párů [-]  
 $f$  – frekvence [Hz]

Synchronizační konstanta se spočítá s pomocí vzorce:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \beta} \Delta \beta \quad [77]$$

Pro  $\Delta \beta = 1$  se získá z rovnice:

$$k_s = m \left( \frac{U_{1f} U_b}{X_d} \sin \beta + U_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right) \quad [78]$$

$k_s$  - synchronizační konstanta [W]

Uvažuje se zanedbáním odporu  $R_{1f}$  a případu, kdy je rozptylová reaktance  $X_\sigma$  je součástí reaktance  $X_d$ .

Pro základní úvahu se uvažuje chod synchronního alternátoru paralelně s tvrdou sítí.

Činný výkon dodávaný do sítě odpovídá základnímu předpokladu tedy:

$$P = m \left( \frac{U_{1f} U_b}{X_d} \sin \beta + U_{1f}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right) \quad [79]$$

Z tohoto můžeme usuzovat maximální činný výkon, který je stroj schopen dodávat do sítě pro  $\sin \beta = 1$  a rovnost reaktancí  $X_d = X_q$ :

$$P_{max} = m \frac{U_{1f} U_b}{X_d} \quad [80]$$

Prokluz pólů nastane tehdy, když se začne příliš zvyšovat zátěžný úhel  $\beta$ . To může nastat, pokud zvyšujeme dodávaný výkon generátoru z turbíny nebo při konstantním výkonu odbuzováním přes danou hranici.

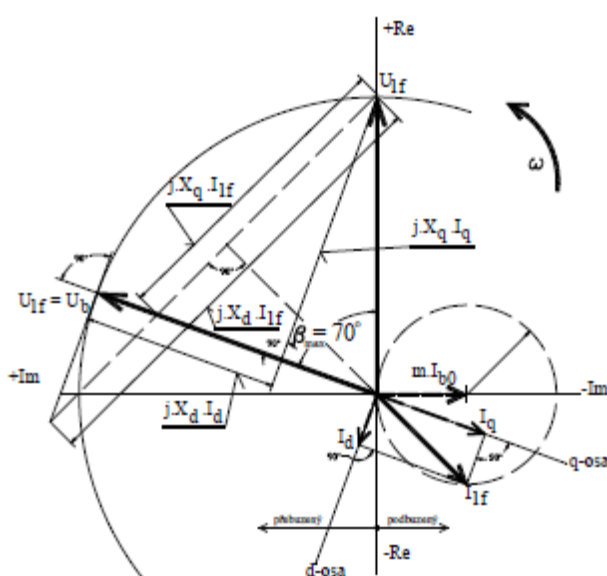
(15)

Dále se uvažuje případ, že synchronní generátor byl právě přirázován dle charakteristiky naprázdno, tedy že napětí budící je rovno napětí fázovému  $U_b = U_{1f}$  a maximální výkon pro uvažování rovnosti reaktancí  $X_d = X_q$  je tedy dán vztahem:

$$P_{max} = m \frac{U_{1f}^2}{X_d} [81]$$

Následující obrázek odpovídá případu, kdy reaktance se nerovnají a úhel  $\beta$  je zvětšen o reluktanční výkonovou část. Poměr reaktancí je  $X_d:X_q = 1,5$  a  $U_b = U_{1f}$ . To toho vyjde maximální výkon pro úhel  $\beta = 70^\circ$ . Při dalším zvýšení výkonu turbíny dojde k prokluzu pólů a stroj se dostává do asynchronního chodu.

(15)



### 15. Mez stability synchronního stroje

Při stavu maximálního výkonu je značný nárůst satorového proudu a ochrany stroje vyhodnocující stav stroje z měření proudů a napětí zajistí odpojení stroje z důvodu překročení maximální dovolené hodnoty proudu.

Druhý případ pro stav, kdy stroj ztratí stabilitu, je v případě odbuzování. Tedy když  $U_b < U_{1f}$ . Při tomto případě klesá synchronizační výkon a v případě nulového budícího proudu  $I_b = 0$  dosáhne meze stability podstatně rychleji než v minulém případě.

Vektor satorového proudu:

$$\vec{I} = -j \frac{\overline{U_{1f}}}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) + j \frac{\overline{U_{1f}}}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-j2\beta} + j \frac{\overline{U_b}}{X_d} [82]$$

Synchronní stroj bez buzení má  $U_b = 0$ . Proud satoru je dán prvním a druhým členem předchozího výrazu. První člen je proud, časově posunutý o  $\frac{\pi}{2}$  za fázovým napětím  $U_{1f}$  a jeho poloha se se změnou zatížení nemění. Druhý člen je také proud, který v chodu naprázdno,

tedy při  $\beta = 0$ , časově předbíhá fázové napětí  $U_{1f}$  o  $\frac{\pi}{2}$ . Ovšem se zatížením se poloha tohoto druhého proudu mění a to s dvojnásobnou hodnotou zátěžného úhlu, avšak ve smyslu opačném.

(15)

### **7.1. Požadavky na budící soustavy:**

- **Vysoká provozní spolehlivost**

Spolehlivost by měla být vyšší než vlastní alternátor. Soustava často obsahuje rezervní budič. Nejvíce spolehlivost soustavy ovlivňuje systém kroužkového sběracího soustrojí.

- **Plynulá a rozsáhlá regulace budícího proudu a napětí:**

Zajištění plynulosti regulace je nutné zajistit rezervu stropu pro destabilizaci přechodového děje. Pro rotační budiče je hodnota stropního napětí 1,6 až 1,8  $U_n$ , pro nezávislé tyristorové budiče 1,6  $U_n$  a pro závislé tyristorové budiče až 2  $U_{fn}$ .

- **Dostatečná rychlost budícího napětí**

Rychlost budícího napětí je charakterizována odezvou budiče naprázdno jako střední rychlost změny poměrného napětí budiče za prvních 0,5 sec. Rychlost budícího napětí je 0,5 až 2 sec.

- **Dostatečná rychlost odbuzení alternátoru**

Rychlost odbuzení alternátoru musí být co nejkratší. Je definována jako snížení magnetického toku ve stroji na nulu. Čím kratší doba odbuzení, tím se více omezuje případný rozsah škod při vnitřních zkratech.

- **Udržování hodnoty svorkového napětí**

Napětí musí být udržováno v mezích tolerancí diagramů napětí, předepsaných pro jednotlivé soustavy, aby bylo možné udržet normální napěťové poměry u spotřebitelů.

- **Dovolené oteplení**

Teplotní odolnost je zapotřebí dodržet v provozních a mimořádných poruchových stavech. Oteplení je závislé především na proudovém zatížení stroje. Dostatečné chlazení je nutné zabezpečit pro vinutí budícího stroje i pro polovodičové součástky v regulátorech buzení.



## 7.2.Druhy budících soustav

Budící soustava jsou zařízení dodávající budící proud stroje. Zahrnují všechny regulační s řídicími prvky včetně zařízení pro odbuzení, potlačení buzení a ochran. Budící vinutí je často umístěno na rotoru. Je z pravidla napájeno stejnosměrným proudem z řízeného zdroje proudu. Druhy budících soustav se dělí na statické, s točitými budiči a bezkartáčové. Druhé kritérium je dle budícího příkonu závislé, nezávislé a kompaundní.

- **Statická budící soustava:**

Budič je v tomto případě statický. Tedy stojící neřízený či řízený usměrňovač. Odebírá energii z jednoho nebo více statických zdrojů.

- **Budící soustava s točivým budičem**

Soustava využívá pro buzení rotoru stejnosměrný stroj s komutátorem. Odebírá mechanickou energii z hřídele, který je poháněn synchronním strojem či jiným strojem.

- **Bezkartáčová budící soustava**

Soustava zajišťuje přenos budící energie bez sběrného ústrojí tak, že usměrňovač se otáčí na společné hřídeli s budícím vinutím hlavního alternátoru a se zdrojem elektrické energie pro buzení.

- **Závislá soustava**

Závislá budící soustava je v případě, že stroj je napájen ze střídavé sítě, ke které je buzený stroj připojen nebo jiné sítě, na které je tedy závislý. V tomto případě se přiváděný budící proud musí usměrnit.

- **Nezávislá soustava**

Nezávislé budící soustavy jsou systémy, které nejsou bezprostředně závislé na stavu sítě, ke které je připojen buzený stroj. Zdrojem je zde stejnosměrné dynamo, budič bývá umístěný na hřídeli buzeného stroje.

- **Kompaundní soustava**

Soustava obsahuje kromě složky závislé na napětí i další komponenty obvykle proudové.

### Klasické budící systémy

Dříve se pro buzení synchronních strojů používaly stejnosměrné točivé budiče umístěné buď na hřídeli synchronního stroje, druhou možností bylo napájení budícího soustrojí střídavým motorem.

Výhodou tohoto způsobu je přívod mechanické energie přímo z rotoru buzeného stroje. Tím je nezávislý na střídavé síti. Budič musí zajistit velký regulační rozsah budicího proudu synchronního stroje. Regulace musí být zajištěna až do 125% jmenovitého napětí plně zatíženého stroje. Budicí zdroj musí zajistit - maximální napětí  $1,5 U_{bn}$  a trvale dodávat  $1,1 U_{bn}$ .

Roztočením generátoru turbínou se budič i generátor postupně samy nabudí. U pomaluběžných strojů je budič robustní a jeho výroba neekonomická. Takový budič má velké časové konstanty a tudíž pomalou odezvu, která je definovaná poměrem velikosti budicího napětí za dobu 0,5 sec k budicímu napětí synchronního stroje při jeho jmenovitém zatížení.

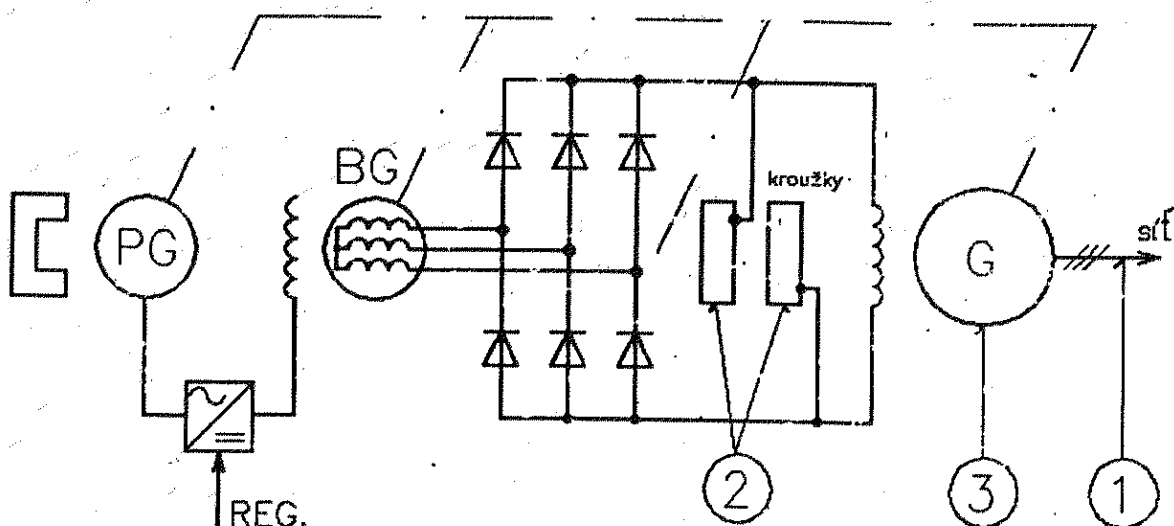
Z uvedených důvodů je výhodnější rychloběžný budič poháněný asynchronním motorem. Asynchronní motor může být připojen ke stejné třífázové síti, do níž pracuje synchronní generátor.

(15)

### **Současné budicí systémy**

Díky vývoji regulační techniky a silové elektroniky se dnešní budicí systémy používají hlavně s usměrňovači. Tyto usměrňovače mohou být statické či rotující. Mohou to být usměrňovače neřízené diodové nebo řízené tyristorové. Další možností je buzení permanentními magnety.

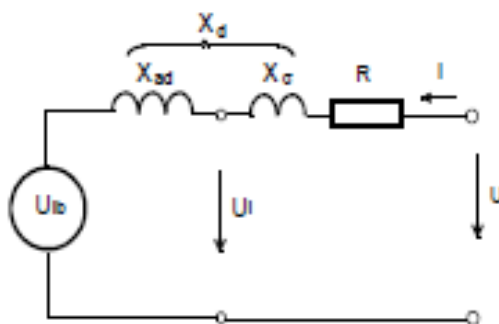
Příkladem může být neřízený diodový usměrňovač uvedený na obrázku 12. Budicí systém je znázorněn s pomocným PG a hlavním budičem BG. Statorové vinutí je připojeno k diodovému usměrňovači, z něhož je napájeno budicí vinutí přes kroužky. Oba budiče i diodový usměrňovač jsou na společné hřídeli s generátorem. Konstrukce rotoru je náročná na mechanické provedení s ohledem na vysoké namáhání odstředivými silami. U tohoto systému se budicí proud převádí do budicího vinutí přes kartáče a kroužky. Aby se odstranil tento kluzný kontakt, použijí se budicí soustavy, které mají usměrňovač umístěný přímo na rotoru.



16. Diodový neřízený usměrňovač

(15)

## 8. Výkonová bilance jalového výkonu



17. Náhradní schéma synchronního stroje

Pro síť je nezbytné mít k dispozici určité množství jalového výkonu. Ten lze získávat kompenzačními prvky v místech odběru nebo řízením buzení alternátoru. V případě získávání jalového výkonu z alternátoru je výhoda, že je tento provoz velice ekonomický, protože je vyráběn jako vedlejší produkt při výrobě elektrické energie.

V síti je díky spotřebě převážně induktivní jalový výkon, který je nutno kompenzovat na hodnotu, která je blízká  $\cos\varphi = 1$ . Synchronní alternátor je stroj, který v závislosti na buzení dodává určité množství jalového výkonu.

Obecně platí, že činný výkon je úzce spjat s frekvencí a jalový s napětím. Opačně lze tyto vazby zanedbat. Tímto lze říci, že činný výkon lze řídit frekvencí a napětí v daném uzlu jalovým výkonem. Závislost napětí na jalovém výkonu lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta U_i = a_{ij} * \Delta Q_j \quad [83]$$

$\Delta U_i$  – změna napětí v uzlu i [V]

$a_{ij}$  – koeficient citlivosti změny napětí v uzlu i na změnu jalového výkonu v uzlu j [A]

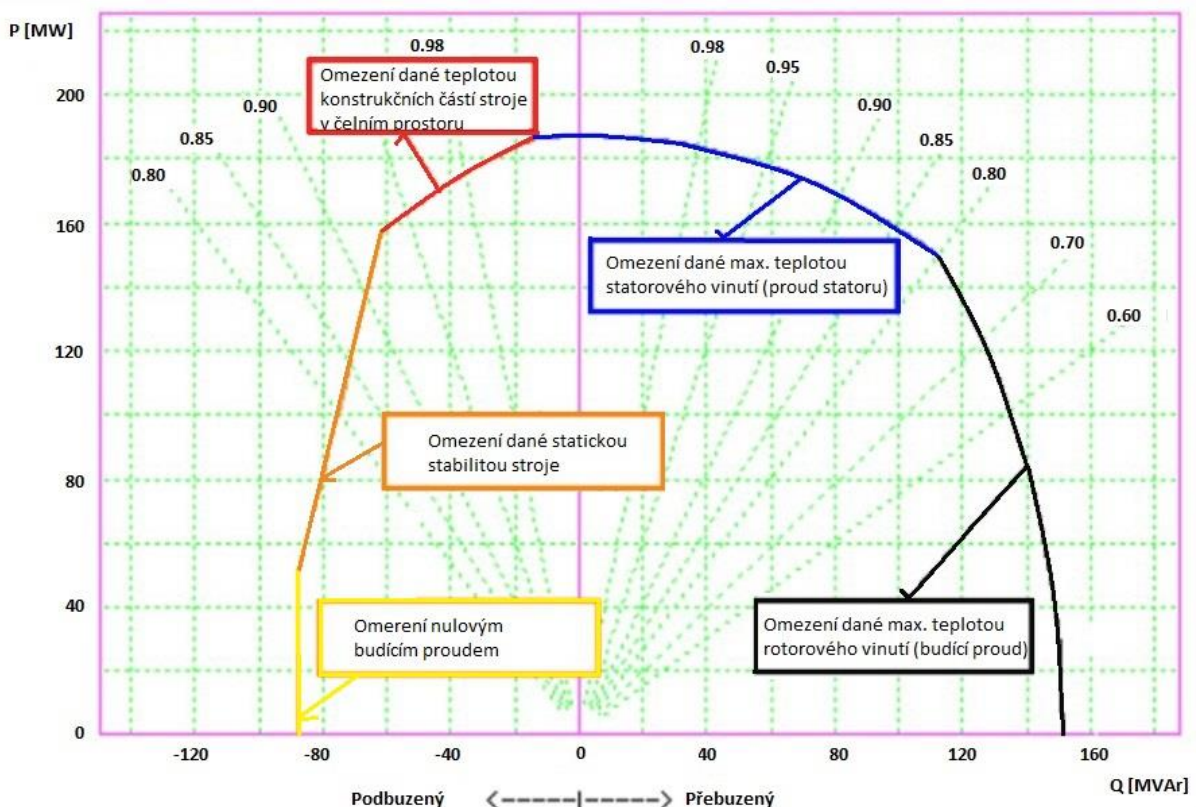
$\Delta Q_j$  - změna jalového výkonu v uzlu j [VAr]

Z tohoto vyplývá, že změnou jalového výkonu v určitém uzlu lze v dalších uzlech změnit hodnotu napětí. Jako hlavní uzel pro změnu jalového výkonu můžeme považovat uzel sítě s alternátorem lze v síti regulovat hodnotu napětí velikostí jalového výkonu tvořenou alternátorem.

(16)

### 8.1. Provozní diagram synchronního alternátoru

Při výrobě energie synchronním generátorem jsou určité omezení daná konstrukčním řešením alternátoru. Záleží především na hodnotách proudů a napětí, které jsou uvedeny od výrobce. Sestrojení provozního diagramu je složen z omezení, které jsou dány maximálními hodnotami, které daný stroj vydrží.



18. Provozní diagram synchronního alternátoru

### **8.1.1. Omezení maximálním budícím proudem**

Omezení maximálním budícím proudem se vztahuje k maximální teplotě vinutí rotoru. Tato hodnota je daná normou. Obvykle se pro konstrukci diagramu používá maximální budící proud. Toto je omezení, které omezuje maximální hodnotu výkonu v části induktivní zátěže a i této části jalového výkonu.

### **8.1.2. Omezení maximálním proudem statoru**

Omezení maximálním proudem statoru se vztahuje k maximální teplotě vinutí statoru. Tato hodnota je daná normou. Pro konstrukci diagramu se obvykle používá jmenovitý proud statoru. Tato část navazuje na omezení proudem rotoru v induktivní části a pokračuje do části činného výkonu.

### **8.1.3. Omezení magnetickým polem v čelním prostoru**

Omezení magnetickým polem v čelním prostoru souvisí s účinkem rozptylového magnetického pole čelních částí vinutí statoru a rotoru, které se projevuje axiálním vstupem do jádra statoru, přičemž indukuje vířivé proudy v masivních konstrukčních částech, které se zahřívají. V přebuzeném stavu, když stroj dodává jalový výkon do sítě, vektorově působí obě vinutí proti sobě a výsledné rozptylové pole je slabé. Naopak při podbuzeném stavu při odebrání jalového výkonu ze sítě, je fázový úhel natolik posunutý, že výsledné rozptylové pole značně zesílí. Toto omezení je v diagramu v části kapacitní zátěže.

### **8.1.4. Omezení statickou stabilitou**

Omezení statickou stabilitou je omezení, kdy je provozní stav alternátoru tedy synchronizační moment nulový. Při překročení meze statické stability vypadne stroj ze synchronizmu. Velikost momentu je úměrná sinu zátěžného úhlu, který je definován úhlem mezi magnetizačním a budícím proudem. Pro zachování stability je nutné, aby synchronizační úhel byl kladný. To odpovídá případu, kdy se při zvýšení zátěžného úhlu se zvýšili i činný výkon. To odpovídá případu, kdy zátěžný úhel je menší než 90°.

$$\frac{\partial P}{\partial \beta_s} = P_{syn} > 0 \quad [84]$$

Obvykle se u provozních diagramů zátěžný úhel nastavuje na 80° a minimální budící proud se nastavuje jako nenulový, obvykle 0,15 jmenovitého budícího proudu.

### **8.1.5. Omezení nulovým budícím proudem**

Toho omezení je především pro provedení s vyniklými póly. Pro vytvoření tohoto omezení uvažuje vztah:  $I_b = 0$ . Při zakreslení do diagramu se uvažuje jako střed kružnice bod:

$$P = 0, Q = -\frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \quad [85]$$

A poloměrem:

$$\frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \quad [86]$$

Pro omezení pro provedení s hladkým rotorem se zakresluje jako přímka.

(17)

## **8.2. Řízení dodávky jalového výkonu**

### **8.2.1. Primární regulátor napětí**

Funkcí primárního regulátoru napětí je hlídání zadané hodnoty svorkového napětí. K regulaci využívá změnu buzení stroje. Omezení regulace je daná maximálním proudem statoru a mezí podbuzení.

#### **8.2.1.1. Změnou zadaného generátorového napětí primárního napětí generátoru**

Tato změna je velmi rychlá. Velikost změny je závislá na velikosti zaslaného změnového impulsu. Změnou hodnoty generátorového napětí zareaguje primární regulátor napětí, který reguluje vzniklou regulační odchylku generátorového napětí.

#### **8.2.1.2. Změnou odbočky blokového transformátoru**

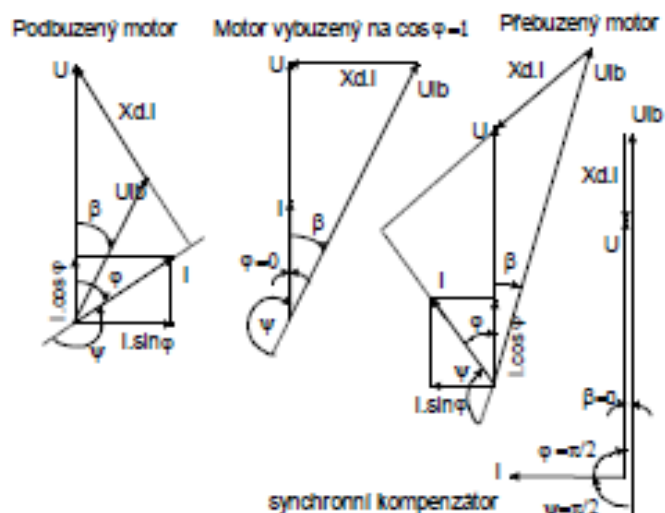
Změna odbočky je skokové provedení změny dodávky jalového výkonu. Tato změna nelze provádět za provozu transformátoru. Výpočet změna je popsána v kapitole dimenzování v části volby převodu. Výpočet a realizace změny je méně přesná než u možnosti změny buzení.

### **8.2.2. Budicí soustavou**

Změnou budicího proudu lze změnit buzení alternátoru a tím i druh jalového výkonu, který jde do sítě. Jinými slovy dodávku a odběr jalového výkonu.

Budicí soustava musí mít splněny některé požadavky pro správnou funkci, jako zabránění převýšení rotorového či statorového proudu, zohlednění stavu podbuzení a kontrolu dovoleného poměru napětí a kmitočtu.

(16)



19. Zjednodušené digramy synchronního motoru

### 8.3. Možnosti řízení jalového výkonu

Při řízení dodávky jalového výkonu lze provádět s určitou kontrolovanou veličinou, která může být daná a kontrolovaná. Mezi tyto veličiny patří:

- Zadaná hodnota generátorového napětí
- Zadaná hodnota jalového výkonu
- Zadaná hodnota účinníku
- Zadaná hodnota napětí v pilotním uzlu

Řízení za pomoci generátorového napětí je využíváno hlavně pro řízení jalového výkonu v rámci vlastní spotřeby elektrárny, protože dispečer disponující touto možností řídí hodnotu v rámci elektrárny a nezná hodnotu potřebnou pro síť.

Řízení nastavením hladiny jalového výkonu využívá konstantní nastavení pro jalový výkon pomocí regulátoru jalového výkonu a není možné touto cestou měnit rekčně dostatečné aktuální množství jalového výkonu v síti.

Řízení pomocí hodnoty účinníku hlídá poměr dodávky činného a jalového výkonu ve všech provozních stavech. Mění dodávku jalového výkonu v závislosti na výrobě činného výkonu.

Řízení pomocí hodnoty napětí v pilotním uzlu řídí pomocí automatického regulátoru napětí. V závislosti na zadané hodnotě napětí v uzlu soustavy průběžně vyrovnává bilanci jalového výkonu v předávacím uzlu.

(16)

## 9. Závěr

MVE Štětí je zcela nová malá vodní elektrárna uvedená do provozu v roce 2014.

Úkolem má práce bylo provést kontrolní návrh technického řešení elektročásti této MVE a zhodnotit, porovnat realizované řešení MVE s mým návrhem. Dalším úkolem bylo zvážit některé technické otázky, které se projeví dosavadním provozem elektrárny.

V mé práci jsem postupoval jako při zcela novém návrhu zcela nové elektrárny. První otázkou tak bylo řešení jednopólového schématu, řešení napájení vlastní spotřeby, dimenzování vybraných zařízení apod. Jednotlivá navrhované řešení jsem hodnotil jak z technického, provozního tak i ekonomického pohledu. Mnou navržené řešení jsem porovnal s realizovaným řešením MVE. Ze závěru z tohoto porovnání vychází realizované řešení jako optimální kompromisní řešení splňující ekonomické i provozní požadavky. V dimenzování realizovaného zařízení jsem také nenašel žádnou chybu.

Jedním z úkolů diplomové práce bylo zhodnotit vlivy MVE na distribuční síť 22 kV a zjistit, zda rozhodnutí vyvést výkon do vzdálené linky bylo správné a případně přehodnotit, zda nedošlo ke změně situace v síti 22kV a nebylo by možné vyvést výkon elektrárny do blízkého kabelového vedení.

Výsledkem mé práce je zjištění, že do blízkého kabelového vedení je možné vyvést maximálně výkon jen jednoho soustrojí a tak rozhodnutí vyvést celý výkon MVE do vzdáleného venkovního vedení 22kV bylo správné i když relativně nákladné.

Vzhledem k tomu, že technologie elektrárny umožňuje provoz do vyčleněné sítě, byla věnována jistá pozornost i tomuto provoznímu stavu. Základním problémem je indikace přechodu z provozu paralelně se sítí do stavu provozu do vyčleněné sítě. Jako nejlepší se z rozboru zdá využití kritéria vektorového skoku napětí nebo kritéria LOM.

Vzhledem k přebytku jalového kapacitního výkonu v distribuční síti, je nyní požadavek i na provoz synchronních generátorů v mírně podbuzeném stavu, kdy generátor odebírá ze sítě jalový výkon. Tento stav by mohl způsobit nestabilní provoz generátoru. Z tohoto důvodu jsem se v mé práci také zabýval statickou a dynamickou stabilitu navrženého stroje. *Výsledkem* rozboru této problematiky je, že použitý stroj má dostatečnou rezervu i v podbuzeném stavu od meze provozního stavu s účínkem 0,95 induktivních. Běžný provozní stav generátoru je s účínkem 0,99 induktivních. Provoz s účínkem 0,99 induktivním není nebezpečný pro generátor a je ekonomicky optimální, neboť výkon budiče je minimální a proud satoru je rovněž nejnižší při daném činném výkonu.

Celá tato práce byla pro mě velkým přínosem a její výsledky mohou sloužit pro provozovatele elektrárny jako potvrzení optimálního řešení nové elektrárny a může pro něj sloužit i jako zdroj informací o teoretických otázkách souvisejících s provozem elektrárny.



## 10. Citovaná literatura

1. **CUC, Jan.** Malá vodní elektrárna Štětí. *allforpower*. [Online] březen 2015. [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/metrostav\(1\).pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/metrostav(1).pdf).
2. **ŠPETLÍK, Jan.** Elektrárny, přednáška 1. *powerwiki*. [Online] 2014. [https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/A1M15ENY\\_PR1\\_2014.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/A1M15ENY_PR1_2014.pdf).
3. **FENCL, František.** *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. Praha : ČVUT Praha, 2009.
4. **HEJTMÁNKOVÁ, Pavla.** Dimenzování. *czu*. [Online] <http://home.zcu.cz/~hejtman/PEC/Prednasky/pred4.pdf>.
5. **ŠPETLÍK, Jan.** Elektrárny, přednáška 2. *powerwiki*. [Online] 2014. [https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/A1M15ENY\\_PR2\\_2014.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/A1M15ENY_PR2_2014.pdf).
6. **KŘÍŽ, Michal.** Zkratové proudy, Základní veličiny, jejich výklad. požadavky na ochranu před zkratovými proudy. *in-e*. [Online] 2013. <http://www.in-el.cz/?t=201&p=103020>.
7. **KOLÁŘ, Václav.** *Zkratky v elektrických sítích*. 2005.
8. **VOKÁL, Josef.** Výpočty zkratů v technické praxi. *powerwiki*. [Online] 2012. [https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok\\_%20zkratky\\_%20prednaska\\_textFEL.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkratky_%20prednaska_textFEL.pdf).
9. Zkratky. *pslib.cz*. [Online] [https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/zkrat/dokumenty/Zkratky%20-%20opora.pdf](https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/Zkratky%20-%20opora.pdf).
10. **HUBÁLEK, Milan.** Projektování a návrh rozvaděčů. *odbornecasopisy*. [Online] Listopad 2009. <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39859.pdf>.
11. **ŠVEC, Jan.** Ustálené chody v uzlových sítích. *powerwiki*. [Online] 2016. [https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE\\_pr01\\_ustalene\\_stavy.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_pr01_ustalene_stavy.pdf).
12. Kodex PS, část 5, Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS. *ČEPS*. [Online] květen 2015. [http://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/%C4%8C%C3%A1stV\\_15\\_fin.pdf](http://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/%C4%8C%C3%A1stV_15_fin.pdf).
13. **Booth, Campbell.** Loss of mains protection. *der-lab.net*. [Online] 2011. [http://www.der-lab.net/downloads/booth\\_loss-of-mains.pdf](http://www.der-lab.net/downloads/booth_loss-of-mains.pdf).
14. **Bugdał, Rafał, a další.** Performance analysis of the ROCOF and. *Grouper.ieee.org*. [Online] <http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547.8/email/pdfvIJ0f3BPle.pdf>.
15. Prokluz a statická stabilita synchronního stroje. *fei1.vsb.cz*. [Online] [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/pves/BuzeniSG.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pves/BuzeniSG.pdf).

16. **HABRYCH, Richard.** *Řízení jalového výkonu synchronního generátoru.* Praha : Energetika, 2015.
17. **HORA, Oldřich a kolektiv.** *Regulační a budící systémy synchronních strojů.* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1985.
18. **UHLÍŘ, Ivan.** *Elektrické stroje a pohony.* Praha : ČVUT Praha, 2009.
19. *Příručka pro elektrotechniku* Praha Nakladatelství Europa-Sobotáles cz. s.r.o. 2006
20. **ŠEVČÍK, Jan.** Technické parametry malé vodní elektrárny Štětí. *allforpower.* [Online] březen 2015. <http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/steti.pdf>.
21. **DOLEŽAL, Jaroslav.** Základní výpočet ustáleného chodu BPF. *powerwiki.* [Online] 2014. [https://www.powerwiki.cz/attach/RES/2010\\_A1M1RES\\_PR5.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/RES/2010_A1M1RES_PR5.pdf).
22. **PETRUŽELA, Ivan.** Regulace frekvence a napětí. *powerwiki.* [Online] 2007. [https://www.powerwiki.cz/attach/PES/PES\\_pr05\\_all.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/PES/PES_pr05_all.pdf).
23. **ŠTECHA, Jan.** *Optimální rozhodování a řízení.* Praha : ČVUT Praha, 1999.
24. **VOŽENÍLEK, Petr.** *Elektrické stroje 1.* Praha : ČVUT Praha, 2011.
25. **K., MÁSLA.** Regulace frekvence. *fei1.vsb.cz/.* [Online] [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/res/PrednaskaOstrov%C3%ADProvoz2\\_Maslo.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/res/PrednaskaOstrov%C3%ADProvoz2_Maslo.pdf).

## **11. Obsah přiloženého CD**

Diplomová práce

Seznam příloh

Příloha č. 1 - Jednoduchý systém přípojníc

Příloha č. 2 - Dvojitý systém přípojníc

Příloha č. 3 - Dvojitá záloha vlastní spotřeby

Příloha č. 4 - Vlastní spotřeba z externího zdroje

Příloha č. 5 - Blokové transformátory

Příloha č. 6 - Jednopolové schéma

Příloha č. 7 - Jednopolové schéma – Zkrat

Příloha č. 8 - Přehledové schéma - měření

Příloha č. 9 - Přehledové schéma - ochrany

Příloha č. 10 - Zkratové poměry

Příloha č. 11 - Studie připojitelnosti

Příloha č. 12 – Zhodnocení a popis návrhu

## 12. Seznam tabulek

1. Dovolené úbytky napětí pro různé hladiny napětí.....	5
2. Dovolené úbytky napětí pro některé přístroje.....	5
3. Tabulka součinitele k pro výpočet nárazového zkratového proudu.....	9
4. Tabulka uzlu.....	13
5. Srovnávání synchronního a ostrovního provozu a pokrývání nerovnováhy $\Delta P$ .....	20
6. Vymezení frekvence pro pásma provozu.....	20

### 13. Seznam obrázků

1. Závislost hospodárné proudové hustoty na době plných ztrát .....	4
2. Schéma transformátoru pro volbu převodu .....	6
3. Průběh zkratového proudu .....	8
4. Druhy zkratů .....	9
5. Výpočet ustáleného chodu.....	13
6. Gauss-Seidelovametoda.....	14
7. Newton-Rasphonova metoda .....	16
8. Metoda LOM citlivost.....	21
9. Příklad změny frekvence při ztrátě připojení k síti.....	22
10. Přímá kontrola vypnutí.....	22
11. Přímé měření otevřených kruhových sítí .....	23
12. Náhradní schéma synchronního stroje .....	24
13. Vektorový diagram synchronního stroje s hladkým rotorem .....	24
14. Vektorový diagram synchronního stroje a vyniklými póly.....	25
15. Mez stability synchronního stroje .....	27
16. Diodový neřízený usměrňovač .....	31
17. Náhradní schéma synchronního stroje .....	31
18. Provozní diagram synchronního alternátoru .....	32
19. Zjednodušené digramy synchronního motoru.....	35

## **14. Hodnocení práce**